

Tuomas Hintikka

Tiiviysmittaukset sisäilmastoteknisissä selvitystöissä

Ilmavuotoa osoittavat merkkiainelaitteistot

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Rakennustekniikka

Insinöörityö

2.12.2013

Tekijä Otsikko Sivumäärä Aika	Tuomas Hintikka Tiiviysmittaukset sisäilmastoteknisissä selvitystöissä. Ilmavuotoa osoittavat merkkiainelaitteistot 61 sivua + 5 liitettä 2.12.2013
Tutkinto	insinööri (AMK)
Koulutusohjelma	Rakennustekniikka
Suuntautumisvaihtoehto	Rakennetekniikka
Ohjaajat	Osastopäällikkö, DI Ilkka Jerkku Lehtori, DI Jorma Säteri
<p>Tämä opinnäytetyö käsittelee ilmavuotojen ja terveysriskien arvioinnissa käytettäviä merkkiainekoelaitteistoja. Työ tehtiin Sweco-konserniin kuuluvan Finnmap Consulting Oy:n Suomen Sisäilmaston Mittauspalvelulle, joka tarjoaa rakenne-, LVI- ja sisäilmateknisten asiantuntijoiden muodostaman ryhmän palveluita.</p> <p>Ulkoilma sisältää aina kosteutta. Hallitsemattomat ilmavuodot rakennuksen vaipparakenteissa kuljettavat mukanaan erilaisia epäpuhtauksia ja kosteutta. Kosteuden seurauksena rakenteeseen syntyvä mikrobikasvusto sekä muut rakenteeseen kulkeutuvat epäpuhtaudet voivat aiheuttaa sisäilmaongelmia.</p> <p>Ilmavuotojen osoittamiseen voidaan käyttää eri menetelmiä, joita työssä tarkastellaan. Ilmavuotoja paikallistetaan merkkiaineena toimivan kaasun avulla, jota päästettiin tutkittavaan rakenneosaan. Tutkittavaa rakenneosaa tarkkailtiin kaasupitoisuutta mittaavien kaasuanalysaattoreiden avulla ja mahdolliset vuotokohdat saatiin näin esille. Teoriaosuudessa perehdyttiin rakentamisen peruskäsitteistöön ja tyypillisiin sovelluksiin. Lisäksi vertailtiin kahden eri laitevalmistajan kaasuanalysaattoreita ja perehdyttiin laitteistojen toimintaan, kaasumittausten toteutukseen, kaasujen ominaisuuksiin sekä ilman ominaisuuksiin. Ilmatiivyyden toteutusta tarkasteltiin eri näkökulmista.</p> <p>Käytännön osuudessa selostettiin eri toteutettuja merkkiainekokeita ja järjestettiin laitteistojen käytännön vertailu alipaineistetussa, suljetussa kuilurakenteessa.</p> <p>Merkkiainekokeet toteutettiin pääsääntöisesti alipaineistetussa tilassa, jolloin tuloksien toistettavuus on parempi.</p> <p>Rakennusten ilmatiivyyteen on syytä kiinnittää yhä enemmän huomiota laadukkaan rakennuksen sisäilman sekä hyvän energiatehokkuuden saavuttamiseksi. Laadunvalvonta rakennuksen rakentamisvaiheessa sekä korjaustyömaan toteutuksen aikana estää terveyshaittoja ja edistää hyvän sisäilman saavuttamista.</p>	
Avainsanat	merkkiaine, merkkiainekaasu, kaasuanalysaattori, ilmatiiviyys, rakennetutkimus, rakennetiiveystutkimus, rikkiheksafluoridi, vety-typipikaasu, radon-tiiviyys, konvektion estäminen, diffuusio.

Author Title Number of Pages Date	Tuomas Hintikka Air tightness measurements in indoor air investigations. Tracer gas measurements indicating air leaks 61 pages + 5 appendices 26 November 2013
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Civil Engineering
Specialisation option	Structural Engineering
Instructors	Ilkka Jerkku, Group Leader, Sweco Jorma Säteri, Senior Lecturer
<p>This thesis was made for the Suomen Sisäilmaston Mittauspalvelu of Finnmap Consulting Ltd in Sweco Group. Suomen Sisäilmaston Mittauspalvelu offers a variety of professional indoor air consulting services as well as structural engineering and HVAC analysis services.</p> <p>Outdoor air typically always contains moisture. Uncontrollable air leaks in a building's transport air moisture and can create moisture and indoor air problems. The aim was to investigate the use of tracer gas and gas analysers in finding the air leaks in the building envelope. Air pressure affects measurements considerably, and should be considered while performing the measurements.</p> <p>The first part of the thesis concentrates on building physics and different methods of finding air leaks. The second part of the thesis focuses on air leak measurements made with gas analysers on different sites. As a tracer gas, sulphur hexafluoride and hydrogen-nitrogen-compound were used.</p> <p>The results indicate that both gas analysers have positive and negative features in e.g. portability. During the tests, some differences between the properties of the gases were noticed. The risk of errors and wrong statements is relatively high. Two different tracer gases were used in these tests and some differences were noticed but further studies on gas properties can be considered.</p> <p>In order to succeed in reaching a good level in indoor air quality and a-high energy-efficiency, reliable quality inspections and air tightness measurements are needed.</p>	
Keywords	air leak, air tightness, building physics, tracer gas, structural engineering, radon tightness, prevention of convection, prevention of diffusion, sick building syndrome.

Sisällys

Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Perustietoa	2
2.1	Ilmakehän ominaisuuksia	2
2.2	Vety, H ₂	3
2.3	Rikkiheksafluoridi, SF ₆	3
2.4	Typpi, N ₂	3
2.5	Radon, Rn	3
2.6	Daltonin laki ja diffuusio	3
2.7	Tuuli	5
2.8	Lämpöenergian siirtymistavat	5
2.9	Vesihöyryn konvektio	5
2.10	Kondenssi	6
2.11	Vesihöyrynläpäisevyys	7
2.12	Vesihöyrynvastus	7
3	Rakennuksen osat	7
3.1	Katto ja ulkoverhous	7
3.2	Tuuletusväli	8
3.3	Tuulensuojakerros	8
3.4	Lämmöneristyskerros	8
3.5	Ilmansulkukerros	9
3.6	Höyrynsulkukerros	9
3.7	Höyrynsulun sisäpuolella sijaitseva rakennuslevy	10
3.8	Savupiippuilmio	10
4	Rakennuksen sisäilmaan vaikuttavia tekijöitä	11
4.1	Painovoimainen ilmanvaihto	11
4.2	Koneellinen ilmanvaihto	12
4.3	Rakennuksen painesuhteiden tarkkailu	13
4.4	Ilmanvaihtojärjestelmä osana terveellistä sisäilmaa	14
4.5	Sisäilman epäpuhtauksista, terveyshaitat	15
4.6	Radon-turvallisuus	16
4.7	Ilmavuodot käytännössä	18

4.8	E-luvun laskenta, vaipan ilmatiiviys ja määräykset 2012	20
4.9	Ilmanpitävyysmittaus	21
4.10	Merkkiainekokeet	22
4.11	Rakennuksen sisällä tapahtuva epäpuhtauksien leviäminen	22
4.12	Rakenteiden tiivistystyö	23
4.13	Rakenteiden kapselointi	25
5	Kirjallisuusselvitys ja laitteiston tekninen tarkastelu	25
5.1	Haku Internetistä ja tietokannoista	25
5.2	Tarkasteltavien merkkiainekoelaitteistojen kaasu	26
5.3	Laitteistot, Sensistor XRS9012	27
5.3.1	Laitteiston virhelähteet ja vikatilanteet	30
5.4	Rikkiheksafluoridilaitteisto, Innova 1412	30
5.4.1	Laitteiston virhelähteet ja vikatilanteet	32
6	Merkkiainekokeiden toteutuksesta	33
6.1	Työnaikainen laadunvalvonta	33
6.2	Ulkoseinän merkkiainekokeet	33
6.3	Alapohjan merkkiainekokeet	34
7	Käytännön kenttäkokeet laitteistoilla	35
7.1	Kokeiden 1, 2 ja 3 suorituspaikka	35
7.1.1	Merkkiainekoe 1: 13.2.2013, TILA 1	35
7.1.2	Painesuhteet	35
7.1.3	Mittaustapahtuma	36
7.1.4	Tulos, koe 1:	36
7.2	Merkkiainekokeet 2 ja 3: 13.2.2013, TILA 2	36
7.2.1	Painesuhteet, kokeet 2 ja 3:	38
7.2.2	Mittaustapahtuma	38
7.2.3	Tulos, koe 2	39
7.2.4	Tulos, koe 3:	40
7.3	Kokeet 4 ja 5: 11.7.2013, TILAT 3 ja 4	40
7.3.1	Koe 4	41
7.3.2	Painesuhteet	41

7.3.3	Mittaustapahtuma	42
7.3.4	Sensistor	42
7.3.5	Innova	42
7.3.6	Tulos, koe 4	43
7.3.7	Koe 5: 11.7.2013, TILA 4	43
7.3.8	Paine-erot	44
7.3.9	Mittaustapahtuma	44
7.3.10	Sensistor	44
7.3.11	Innova	45
7.3.12	Tulos, koe 5	46
7.4	Kokeet 6,7,8,9 ja 10: 3.11.2013, TILA 5	46
7.4.1	Paine-erot	49
7.4.2	Sensistor	49
7.4.3	Innova	52
7.4.4	Tulos, kokeet 6,7,8,9 ja 10	53
8	Tulosten arviointi	53
8.1	Virheen arviointi	53
8.2	Vertailua	55
9	Rakentamisen laadunvalvonta	56
10	Johtopäätökset	57
11	Lähteet	58
Liitteet		
Liite 1		
Liite 2		
Liite 3		
Liite 4		
Liite 5		

Käsitteistö

Absoluuttinen kosteus	Vesihöyrypitoisuus (g/m^3) tarkoittaa vesihöyryn absoluuttista määrää kuutiossa ilmaa.
Aerosoli	Ilmassa leijuvia pieniä hiukkasia. Jaetaan edelleen hienoihin hiukkasiin (pienempi kuin $1\ \mu\text{m}$) ja karkeisiin hiukkasiin (suurempi kuin $1\ \mu\text{m}$).
Asbesti	Yleisnimike laajasti käytetyille, lujuus- ja paloteknisiltä ominaisuuksiltaan erinomaisille silikaattimineraaleille. Todistetuksi vaarallinen terveydelle.
Diffuusio	Molekyylien liikettä kaasuseoksessa, joka pyrkii tasoittamaan seoksessa vallitsevat osapaine-erot.
Fotoakustinen mittaus	Tutkittavaan aineeseen absorboituneen sähkömagneettisen energian (esim. valo) mittaamista.
HTP-arvo	Haitalliseksi tunnettu pitoisuus on ilman kemikaalipitoisuus, jonka Sosiaali- ja terveysministeriö arvioi aiheuttavan haittaa tai vaaraa työntekijän terveydelle.
Höyrynsulku	Ainekerros, joka estää lämpimältä puolelta kylmempään tapahtuvan ilman vesihöyryn haitallisen diffuusion.

Ilmanvuotoluku	Rakennuksen vaipan ilmatiiviyttä kuvaava luku, ilmoittaa rakennuksen läpi virtaavan ilmamäärän suhteessa rakennuksen sisäosan tilavuuteen. Mitataan 50 Pascalin alipaineella, mittayksikkönä 1/h.
Ilmanäyte	Esim. 6-vaiheimpaktorilla otettava ilmanäyte.
Ilmansulku	Rakenneosan läpi kulkeutuvan haitallisen ilmapirran estävä rakenneos
Infrapunasäteily	Sähkömagneettista säteilyä, kattaa taajuusalueen noin 300 GHz - 430 THz. Matalampitaajuisia kuin näkyvän valon taajuus.
Kapillaarisuus	Kosteuden siirtymistä rakenteen huokosissa nesteinä.
Kondenssi	Ilman vesihöyryn tiivistymistä vedeksi esim. kylmän kappaleen pinnalla.
Konvektio	Kaasun tai nesteen mukana tapahtuvaa lämmönsiirtymistä.
Kosteuseriste	Pienen vesihöyryn läpäisevyyden ja suuren vesihöyrynvastuksen omaava rakennustuote.

Kreosootti, karboliterva	Kivihiiltä kuivatislaamalla saatu tisle, jota on käytetty suomalaisessa rakentamisessa kosteuseristämiseen ja puun kyllästämiseen. Väriltään yleensä tummanruskeaa.
Kosteussulku	1990-luvulle asti rakentamisessa käytetty sementtipohjainen, noin C30/37 lujuusluokan omaava tuote. Ominaisuudet eivät vastaa 2000-luvun kosteuseristämisen vaatimuksia.
Ilman kyllästymiskosteus	Ilmakuution maksimissaan sisältämän kosteuden määrä.
LD50	Aineen myrkyllisyyttä kuvaava arvo. Tämän arvon suuruinen määrä tutkittavaa ainetta riittää tappamaan puolet koeläimistä.
Materiaalikosteus	Materiaalissa oleva kosteus, yksikkönä usein veden massan ja kappaleen kuivan massan tai tilavuuden välinen suhde [% , kg/m ³].
Mikrobit	Mikrobit ovat biologisia viruksia, bakteereita, sieniä, homeita ja alkueliöitä.

Mooli (mol)	Mooli on kemiassa käytetty ainemäärän yksikkö. Se on SI-järjestelmän perusyksikkö. Mooli on ainemäärä, jossa on yhtä monta aineosasta, kuin 12 grammassa hiili-12-isotooppia.
Paine-ero	Rakennusvaipan tai rakenneosan eri puolilla vaikuttavien ilmanpaineiden erotus.
ppm	Parts per million, miljoonasosa. Esim. mg/kg.
Rakennuksen vaippa	Lämpimän tai puolilämpimän tilan kylmästä ulkoilmasta erottava rakennusosakokonaisuus.
Savupiippuvaikutus	Ulko- ja sisälämpötilan erosta aiheutuva paine-ero. Lisäksi tilan korkeus vaikuttaa paine-eroon.
Suhteellinen kosteus	Ilman vesihöyrypitoisuuden (g/m^3) suhde vesihöyryn kyllästyskosteuteen tarkasteltavassa lämpötilassa ja paineessa.
Rakennekosteus	Rakennusvaiheen aikana rakenteisiin imeytynyt tai jäänyt rakennuksen käytönaikaisen tasapainokosteuden ylittävä kosteus.

Vesihöyryn kyllästyskosteus Suurin mahdollinen ilman sisältämä kosteusmäärä (g/m^3)
kussakin lämpötilassa.

Vesihöyryn läpäisevyys Aineen kyky päästää lävitseen vesihöyryä. Diffuusiota laskennallisesti tarkasteltaessa vesihöyryn läpäisevyys oletetaan vakioksi, vaikka se on riippuvainen aineen kosteudesta.

1 Johdanto

Sweco-konsernin Suomen Sisäilmaston Mittauspalvelu on keskittynyt korjaussuunnitteluun, LVI-tekniikan selvityksiin sekä sisäilman laadun hallintaan. Se tarjoaa monipuolista teknistä konsultointia koko rakennuksen sisäilmaongelmien ratkaisemiseksi ja korjaushankkeiden läpiviemiseksi.

Merkkiainekokeet auttavat sisäilmaongelman aiheuttajan selvittämisessä varsinkin laajemmissa rakennuskokonaisuuksissa sekä suurissa tiloissa. Merkkiainekokeet toteutetaan yleensä alipaineistamalla tutkittava tila, jolloin saadaan tarkat tutkimustulokset tutkittavan rakenneosan ilmatiiviydestä. Myös hajun lähteen täsmällinen selvittäminen on yksi kaasuanalysaattoreiden käyttökohde, sillä ihmisen hajukynnys on eräiden kaasumaisten yhdisteiden osalta alle 10 miljardiosaa (ppb) kuutiometrissä ilmaa. Sisäilmaongelmaa aiheuttavat mikrobien aineenvaihduntatuotteet voivat olla myös kaasumaisessa muodossa.

Ulkoilma sisältää aina kosteutta, joka hallitsemattomien ilmavuotojen seurauksena voi kulkeutua rakennuksen rakenteisiin, tiivistyä rajapintoihin ja aiheuttaa kosteusongelmia. Rakennuksen vaipan hallitsemattomat ilmavuodot aiheuttavat myös rakennuksen energiankulutuksen kasvamista.

Painesuhteiden tarkkailulla saadaan kuva rakennuksen käytön aikaisista painesuhteista ja mahdollisista poikkeamista. Tuulen vaikutuksesta voivat rakennuksen hetkelliset painesuhteet vaihdella yli 30 Pa, ja rakenteiden tiivistämisellä pyritään katkaisemaan ilmayhteys rakennuksen vaipan ja sisäilman väliltä. Onnistunut tiivistyskorjaus sisältää huolellisen ennakkosuunnittelun ja osaavan urakoitsijan laadunvalvontoineen korjaustyön edetessä.

2 Perustietoa

2.1 Ilmakehän ominaisuuksia

Ilmakehä on maapalloa ympäröivä kaasukehä. Tässä sillä tarkoitetaan troposfääriä, joka on ilmakehän alin kerros. Sääilmiöt tapahtuvat tässä ilmakehän alimmassa kerroksessa. Se ulottuu noin kymmenen kilometrin korkeuteen. Päiväntasaajalla troposfäärin yläraja, tropopausi, on noin 12 kilometrin korkeudessa, napa-alueilla noin kahdeksassa kilometrissä. Ilma sekoittuu troposfäärissä tehokkaasti sekä pysty- että vaakasuunnassa. Siksi pitkäikäiset kaasut ovat tasaisesti sekoittuneita. Sen sijaan lyhytikäiset kaasut sekä hiukkaset eivät ehdi sekoittua, ja niitä havaitaan vain päästölähteensä läheisyydessä (13).

Ilmakehän molaarinen kaasukoostumus merenpinnan läheisyydessä on taulukossa 1.

Taulukko 1. Ilmakehän molaarinen kaasukoostumus (14). Ilmakehä sisältää vaihtelevia määriä vesihöyryä riippuen olosuhteista.

Kuivan ilman koostumus lähellä merenpintaa

Aine	Mooliosuus
Typpi, N ₂	0,78084
Happi, O ₂	0,20948
Argon	0,00934
Hiilidioksidi, CO ₂	0,000345
Neon	0,00001818
Helium	0,00000524
Metaani	0,00000168
Krypton	0,00000114
Vety	0,0000005
typpioksidi	0,0000005
Xenon	0,000000087

Taulukosta havaitaan, että ilmakehässä on eniten typpeä, sitten happea ja argonia.

Vesihöyryä ilmassa on vaihtelevia pitoisuuksia, ja vesihöyryn pitoisuus vaihtelee suuresti ympäristöolosuhteiden ja vuodenaikojenkin mukaan. Vetyä on luonnostaan ilmakehässä, mutta taulukosta nähdään, että sitä esiintyy hyvin vähäisiä määriä. Rikkiheksafluoridia ei esiinny luontaisesti ilmakehässä lainkaan.

2.2 Vety, H_2

Vety on normaaleissa paine- ja lämpötilaolosuhteissa väritön ja hajuton kaasu. Kaasu koostuu kahdesta yhteenliittyneestä vetyatomista, jolloin sen molekyylimassa on 2,016 g/mol. Se on normaaliolosuhteissa melko pysyvä kaasu. Sen kiehumislämpötila on $-253\text{ }^{\circ}\text{C}$ ja sen sulamispiste on $-260\text{ }^{\circ}\text{C}$. Vety on kaasumaisena erittäin helposti syttyvää ja sen 18-60-prosenttiset seokset ilmaseokset ovat räjähtäviä (14).

2.3 Rikkiheksafluoridi, SF_6

Rikkiheksafluoridi on normaaleissa paine- ja lämpötilaolosuhteissa väritön ja hajuton kaasu. Se koostuu rikkiatomista ja siihen liittyneistä, kuudesta fluoriatomista. Sen molekyylimassa on 146,1 g/mol (15). Se on ei-polaarinen ja on erittäin pysyvä yhdiste. Se on voimakas kasvihuonekaasu. Sitä ei esiinny luonnossa (14.) Sen kiehumislämpötila on $-64\text{ }^{\circ}\text{C}$ (15).

2.4 Typpi, N_2

Typpi on normaaleissa paine- ja lämpötilaolosuhteissa väritön ja hajuton kaasu. Se koostuu kahdesta typpiatomista. Sen molekyylimassa on 28,02 g/mol. (14.). Sen kiehumislämpötila on $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ (17).

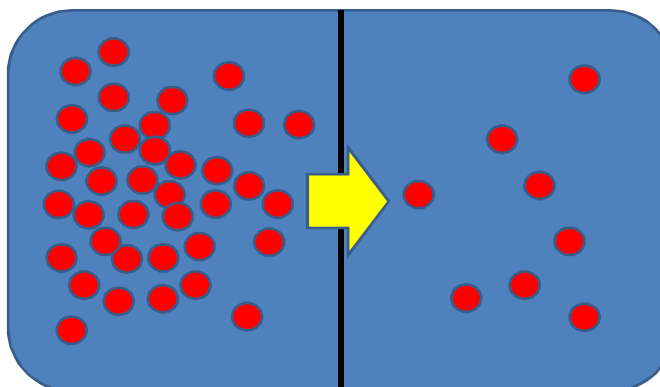
2.5 Radon, Rn

Radon on väritön ja hajuton kaasu. Se koostuu yhdestä radonatomista. Sen molekyylimassa on 222 g/mol (14). Se on radioaktiivinen kaasu, joka hengitysilmaan joutuessaan voi aiheuttaa keuhkosityöpää. Suomessa se aiheuttaa vuosittain noin 300 keuhkosityöpätapausta (28).

2.6 Daltonin laki ja diffuusio

Kaasujen osapainelaki vuodelta 1802 on nimetty John Daltonin mukaan. Lain mukaisesti epämääräisesti liikkuvassa kaasuseoksessa kaasumolekyylit pyrkivät liikkumaan siten, että lopputuloksena on tasaisesti jakautunut kaasuseos. Tätä kutsutaan diffuusioksi (1).

Daltonin lain mukaan kaasun kokonaispaine on kaasun eri komponenttien osapaineiden summa. Tällöin oletetaan, etteivät kaasut reagoi keskenään.



Kuva 1. Aineen diffuusiota puoliläpäisevän kalvon, paperin tai esim. reiän läpi. Aineen pitoisuuserot pyrkivät tasaantumaan suuremmasta pitoisuudesta pienempään, vasemmalta oikealle.

Daltonin lain mukaan kaikki kaasut ilmassa käyttäytyvät kuten vesihöyry. Tämä pätee siis myös hiilidioksidille, hapelle, vedylle ja rikkiheksafluoridille. Vesihöyryn liike rakenteen läpi on rakennustekniikassa yleisimmin käytetty diffuusion tarkastelutapaus. Tämän mahdollistaa eri aineiden vesihöyryn läpäisevyys, ja lähes kaikki materiaalit päästävät vesihöyryä läpi.

Diffuusion suunta on rakennuksia tarkasteltaessa yleisesti lämpimästä tilasta kylmempään, ts. suuremmasta vesihöyryn osapaineesta pienempään osapaineeseen (1). Eri diffuusioon vaikuttavista tekijöistä tärkein on eri tilojen välillä vallitseva kosteusero, eli tilasta, jossa vesihöyryn osapaine on suurempi, pyrkii pitoisuusero tasoittumaan tilaan, jossa osapaine on pienempi.

Diffuusion suunta voi olla myös kylmemmästä tilasta lämpimämpään, mikäli kylmän tilan vesihöyryn osapaine on suurempi kuin lämpimämmän tilan (1). Tämä toteutuu usein esimerkiksi maanvaraista laattaa tarkasteltaessa, mikäli rakennuksen sisätiloissa ei ole suurta kosteusrasitusta ja koska maaperän suhteellinen kosteus on yleisesti 100%. Betonilaattaa tarkasteltaessa diffuusion suunta on yleensä vuosikaudet sama, ulkotiloista rakennukseen sisälle päin, jolloin tästä voi aiheutua merkittävää kosteusrasitusta laatalle. Kosteusteknistä toimivuutta huomioitaessa on kuitenkin otettava huomioon, että diffuusion etenemisnopeus väliaineessa voi olla hitaampi kuin kosteuden haihtuminen materiaalista.

Huokoisten rakennusmateriaalien kohdalla on harvoin kyse pelkästä pitoisuuserojen tasaantumisesta diffuusion avulla, vaan myös kapillaarinen liike voi tulla kyseeseen (1). Rakenteiden oikea suunnittelutapa vaatii lämmöneristeen ja lämpimän tilan väliin tulevan, riittävän suuren vesihöyrynvastuksen omaavan kerroksen asentamisen (1). Yleisenä periaatteena voidaan sanoa, että koko rakenteen vesihöyrynvastuksen tulee pienentyä kylmään tilaan päin mentäessä, mutta poikkeuksia tästä ovat mm. seiniensä osalta teräsohutlevypinnoitetut rakennukset.

Diffuusio nykyaikaisissa seinämärakenteissa on yleensä hidasta, ja rakennuksen ilmanvaihdon alipaineisuus pyrkii estämään diffuusiokosteuden aiheuttaman kosteusrasituksen haitat rakenteisiin (1).

2.7 Tuuli

Tuuli syntyy, kun lämmin ilma on kevyempää kuin kylmä. Ilman tiheys on riippuvainen ilman lämpötilasta, ja kun esim. aurinko lämmittää ilmaa, se lämpenee, kevenee ja nousee ylöspäin. Tämän keventyneen ilman tilalle virtaa uutta raskaampaa ilmaa, ja aiheutuu tuuli (40).

2.8 Lämpöenergian siirtymistavat

Lämmön siirtymistavat ovat säteily, konvektio ja johtuminen. Säteilynä tapahtuvaa lämmönsiirtoa kuvaa esim. infrapunalämmitin. Konvektio, ”kulkeutuminen”, tarkoittaa väliaineen (ilma, neste) tapahtuvaa lämmön siirtymistä. Tästä esimerkkinä on lämpöpatteria ympäröivän ilman lämpeneminen tai maalämpöjärjestelmän nestevirran lämpöenergia. Johtumista tapahtuu esim. teräspalkissa, jota kuumennetaan toisesta päästä, jolloin myös palkin toinen pää kuumenee jonkin ajan kuluttua.

2.9 Vesihöyryn konvektio

Vesihöyryn konvektio tarkoittaa ilmavirtausten mukana tapahtuvaa vesihöyryn siirtymistä (1). Ilmanpaine-erot aiheuttavat ilmavirtaukset. Konvektiovirtaus, jonka

mukana siirtyy kosteutta, saattaa syntyä luonnollisena tai pakotettuna konvektiona. Luonnollinen konvektio syntyy seinän lämpötilaeroista ja ilman tiheyseroista eri seinän osien välillä. Pakotettu konvektio taas syntyy rakenteessa olevien reikien tai rakojen kautta vaikuttavien ilmanpaine-erojen vaikutuksesta.

Suuri merkitys kosteusvaurioiden ilmaantumiselle on kylmänä vuodenaikana reikien, rakojen ja muiden epätiiviyksien kautta sisältä ulos tapahtuva ilmavirtaus. Tällöin ilmavirtausten mukanaan sisältä ulos kuljettava kosteus määrä on moninkertainen diffuusion vaikutuksesta siirtyvään kosteus määrään verraten. Esimerkiksi sisäpuolisen höyrynsulun vioittumisesta voi aiheutua konvektion vaikutuksesta kosteusvaurio, jota luullaan virheellisesti vesikaton pinnoitteen vaurioksi. (1)

2.10 Kondenssi

Vesihöyryn tiivistymistä vedeksi kutsutaan kondensoitumiseksi. Vesihöyryn kyllästyskosteus ilmoittaa ilman sisältämän kosteus määrän kussakin lämpötilassa. Suhteellinen kosteus on ilman vesihöyrypitoisuuden suhde kyllästyskosteuteen (3). Rakenteen suhteellisen kosteuden ollessa 100% tapahtuu tiivistymistä joko rakenteen sisällä tai sen pinnalla. Siikasen (1) mukaan kondensoitumisen tapahtumapaikkoja ovat yleisimmin

- liian kylmä lämpimään huonetilaan rajautuva rakenteen sisäpinta
- kylmäsillat (esim. ikkunoiden ylityksessä käytetyt leukapalkit)
- höyrynsulun puutteellisuus tai väärä sijainti
- rakenteen höyrynsulussa olevat reiät, jotka mahdollistavat konvektiovirtaukset sisältä ulospäin.

Jotta diffuusio voidaan estää, rakenteet on suunniteltava lämpimältä puolelta riittävän vesihöyryntiiviiksi. Samalla niiden yleisesti tulee myös toimia niin, että vesihöyrynvastus pienenee lämpimästä kylmempään siirryttäessä.

Lauri Pellisen lopputyössä (9.) parhaimmat ilmavuodon estämistulokset saavutetaan kuitenkin mahdollisimman vähän ilmaaläpäisevällä kerroksella, esim. tuulensuojakipsilevyllä. Toisaalta hyvä ilmatiiviys on vain yksi tuulensuojalevyllä tai -kerroksella vaadittava ominaisuus, ja merkittäviä valintaan vaikuttavia osatekijöitä on

myös tuulensuojalevyn kyky vastustaa rakennusaikaista kosteusrasitusta ja kyky päästää kosteuden diffuusiovirtaukset ulospäin.

2.11 Vesihöyrynläpäisevyys

Vesihöyrynläpäisevyys kuvaa aineen kykyä päästää vesihöyryä lävitseen. Tarkasteltaessa diffuusiota laskennallisesti vesihöyrynläpäisevyys oletetaan vakioksi, vaikka todellisuudessa se vaihtelee aineen kosteuden muuttuessa. Vesihöyrynläpäisevyyden yksikkö on $\text{kgm/m}^2\text{s Pa}$. (1)

2.12 Vesihöyrynvastus

Vesihöyrynvastus on käänteinen arvo vesihöyrynläpäisevyydelle. Se kuvaa aineen kykyä vastustaa vesihöyrynvirtausta (1). Diffuusiokosteuden liikkumista ja mahdollista tiivistymistä määritettäessä on tunnettava rakenteen eri osien lämpötilat, eri ainekerrosten vesihöyrynvastukset, lämpötiloja vastaavat kyllästymispaineet sekä suhteellinen kosteus seinämän molemmilla puolilla (1).

Seinämän kosteusteknisessä tarkastelussa oletetaan vesihöyrynvastuksen osapaineen muuttuvan samassa suhteessa kuin seinämässä olevien rakennekerrosten vesihöyrynvastusten (1).

3 Rakennuksen osat

3.1 Katto ja ulkoverhous

Katto ja ulkoverhous toimivat rakennuksen seinärakenteen sääsuojana. Kaikki kattomateriaalit eivät ole vesitiiviitä, vaan esimerkiksi tiilikate suojaa suoralta sateelta mutta päästää kosteuden lävitseen. Tiilikatteen alle asennetaan tämän vuoksi aluskate, joka ohjaa katteen alapuolisen kosteuden räystäälle, estäen veden valumisen katon eristeisiin.

Ulkoverhous ei myöskään ole aina vesitiivis: esimerkiksi tiiliverhous estää suoran sateen pääsyn eristeisiin ja rakenteisiin, muttei ole vesitiivis. Ulkoverhouksen sisäpuolelle jätetään useimmiten tuuletusväli, joka mahdollistaa ulkoverhouksen läpi päässeeseen kosteuden poistumisen ulkoverhouksesta (3).

3.2 Tuuletusväli

Tuuletusväli on tila, jossa ilmavirtaukset pääsevät suunnitellusti syntymään ja liikkumaan. Tuuletusraot ovat tuuletusvälin päissä sijaitsevia aukkoja, jotka johtavat ulkoilmaan, esimerkiksi rakoja alimpien tiilikerrosten välissä tiiliseinässä. Tuuletusvälin tehtävä on poistaa ylimääräinen kosteus rakenteesta tuuletusvälissä tapahtuvan ilmavirtauksen avulla. Tuuletusvälin on oltava riittävän suuri ja koko pituudeltaan avoin, esimerkiksi sokkelin yläpinnasta seinän yläreunaan saakka (4). Tuuletusrakojen tulee olla pinta-alaltaan riittävän suuret, jotta tuuletus toteutuu suunnitellulla tavalla. Betonisandwich-elementeissä tämä on ratkaistu mineraalivillan urituksella. Myös esimerkiksi tiiliseinän sisäpuoliset laastipurseet voivat tukkia tuuletusraon, jolloin kosteustekninen toiminta voi häiriintyä (4).

Tuuletusvälin suunnittelussa tulee ottaa huomioon myös palotekniset vaatimukset, jotka ovat vaativammat esim. puukerrostalojen julkisivulaudoituksessa ja kytkettyjen pientalojen ylä- ja rossipohjissa. Tällöin palokatko tulee ratkaista erityisrakentein.

Energiatohokkuutta silmälläpitäen peltikaton sisäpuolisen tuuletusvälin tarpeellisuudesta on ollut Suomessa keskustelua, mutta pidempiaikaista kokemusta tällaisen rakenteen toiminnasta ei laajasti ole.

3.3 Tuulensuojakerros

Tuulensuojakerroksen tulee olla riittävän tiivis, jotta se estää haitalliset virtaukset lämmöneristekerroksessa. Tuulensuojakerros toimii ilmasulkuna, mutta ei toimi diffuusiosulkuna. Se ei saa kuitenkaan olla liian tiivis, jottei kosteuden poistuminen rakenteista esty. Esimerkiksi tuulensuojakipsilevyä ja puukuitulevyä käytetään tuulensuojalevynä.

Tuulensuojaeristekerros voi parantaa myös rakenteen lämmöneristävyttä. Tuulensuojakerroksen kastuessa ja jäähtyessä se menettää vesihöyryn läpäisevyytensä (3).

3.4 Lämmöneristyskerros

Lämmöneristyskerros estää lämmön siirtymisen rakenteen läpi, ja sen optimaalisen toiminnan kannalta on tärkeää, että kaikki raot sekä epätiiviydet vältetään asennuksen aikana. Lämmöneristyskerros asennetaan tiiviisti kaikkia pintoja vasten (3).

3.5 Ilmansulkukerros

Ilmansulkukerroksen tehtävänä on estää rakenteen läpäiseviä ilmavirtoja, ja se muodostaa yhtenäisen kerroksen. Ilmansulkukerroksen tiiviydestä tulee huolehtia, jotta pientenkin reikien muodostuminen voidaan estää. Pienistäkin rei'istä voi aiheutua rakenteeseen suuria ilmavirtauksia, jolloin ilman mukana kulkeutuva kosteus saattaa aiheuttaa ongelmia. Nämä ilmavirtaukset ovat pääosin konvektion aiheuttamia (3). Ilman- ja höyrynsulkukerrosena voi myös toimia sama rakennekerros, kuten esimerkiksi keveissä rakenteissa tähän tarkoitukseen suunniteltu polyeteenikalvo. Tällöin saumojen tiivistykseen on kiinnitettävä huomiota. Polyeteenikalvon soveltuvuus ilmansulkuksi on varmistettava käyttäen lämpövanhenematonta kalvoa (3).

Rakennuksen kokonaistiiviyteen on ilmasululla suuri vaikutus. Nykyrakentamisessa usein tavoiteltava passiivirakentamisen ilmatiiviysarvo $n_{50} < 0,6$ 1/h (eli 50 Pascalin alipaineella mitattaessa rakennuksen ilmasta enintään 60 prosenttia vaihtuu tunnin aikana) vaatii hyvää suunnittelua ja hyvin toteutettua työtä. Myös itse rakenne voi toimia ilmansulkuna, esimerkiksi betoniseinä, -katto tai -lattia tiiviine saumoineen (3)

3.6 Höyrynsulkukerros

Höyrynsulkukerros voi toimia myös ilmasulkuna. Sen tehtävänä on estää sisätiloista rakenteen sisälle tapahtuvaa kosteuden siirtymistä. Höyrynsulkuna käytetään esimerkiksi polyeteenikalvoa, jolla tulee olla riittävän hyvä ikääntymisen kesto ja riittävä vesihöyrynvastus (3). Höyrynsulku voidaan asentaa kuivissa sisätiloissa rakenteen sisäpintaan, heti sisäverhouksen ulkopuolelle, tai paksuissa rakenteissa max. 50 mm rakenteen sisäpinnasta ulospäin. Höyrynsulusta sisäänpäin asennettava lämmöneristyskerros mahdollistaa sähköputkitusten ja taloteknisten järjestelmien asentamisen niin, ettei höyrynsulku vaurioidu. Yleisimmin käytetään 50 mm eristekerrosta. Kuitenkin tällaisen rakenteen riskit tulee arvioida tapauskohtaisesti, myös työnaikainen kosteusrasitus huomioiden, jotta haitallinen kosteuden keräytyminen voidaan estää.

Höyrynsulkukerros ei ole veden- eikä kosteudeneriste. Märkätiloissa tulee vedeneristys asentaa esim. laatoituksen alle, mikäli pinnoitus ei itsessään ole vedeneriste. Vedeneristyskerroksen ulkopuolelle ei saa yleensä rakentaa höyrynsulkua, jottei kahden tiiviin pinnan väliin jäisi tuulettumatonta rakennekerrosta. Tämä voidaan estää esim. rakentamalla tuuletusväli vedeneristysten ja höyrynsulun väliseen rakenteeseen. Joissakin tapauksissa itse rakenne vesihöyryntiiviine pinnoitteineen toimii höyrynsulkuna, esimerkiksi betonisandwich-elementin sisäkuori tiiviine saumoineen (3).

Höyrynsulkukerroksen tulee olla tiivis koko vaipan alalta. Höyrynsulun toimivuutta voidaan tarkastella seuraavasti rakennuksen pystyleikkauksesta: piirretään yhtenäinen viiva höyrynsulun kohdalle. Mikäli kynää joudutaan nostamaan jossakin kohden, ts. höyrynsulku ei ole siinä kohdassa yhtenäinen, on kynännostokohdassa ongelma.

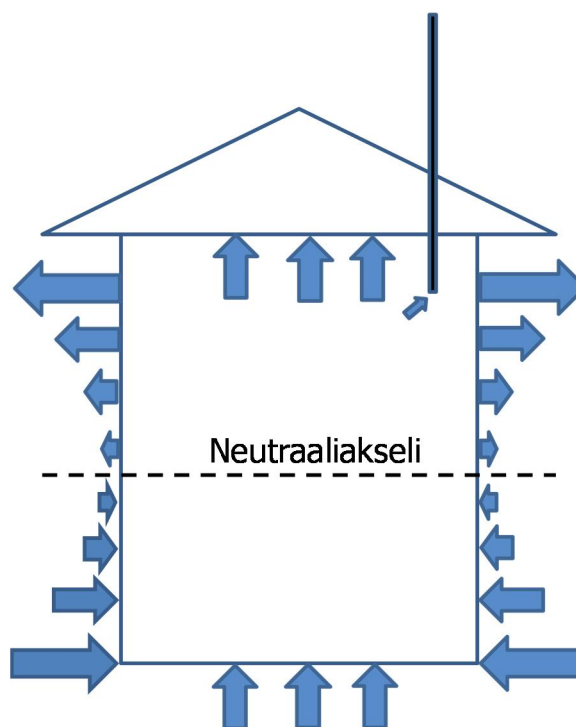
3.7 Höyrynsulun sisäpuolella sijaitseva rakennuslevy

Rakennuslevyn asentaminen höyrynsulun sisäpuolelle on suositeltavaa, jos halutaan hyvä alusta höyrynsululle ja samalla rakennusta jäykistävä osa. Lämmöneristekerroksen paino ei tällöin kohdistu kokonaan esimerkiksi muoviseen höyrynsulkuun ja sen saumoihin, vaan rakennuslevy tasaa eristeen painoa. Myös ullakkotilassa liikkuminen voi aiheuttaa yläpohjan höyrynsulun vaurioitumisen, ja tämä voi toimia alkuna kehittyvälle kosteusvauriolle. Rakennuslevyllä lisäksi estetään lämmöneristekerroksen painaumien muodostuminen, jolloin vaakasuuntaisia konvektioireittejä voi muodostua (3).

3.8 Savupiippuilmio

Huoneilman lämmitessä ilman tiheys pienenee ja keventynyt lämmin ilma pyrkii nousemaan ylöspäin. Huoneen alaosa pyrkii muodostumaan näin alipaineiseksi ja huoneen yläosa ylipaineiseksi (kuva 2). Huoneeseen ja rakennukseen muodostuu myös ns. neutraaliakseli, nollataso, jossa ilmanpaine on sama kuin ulkoilman. Neutraaliakselin sijainti voi vaihdella pystysuuntaisesti painesuhteiden mukaan, ja painesuhteisiin vaikuttavat mm. avoimet ovet, ikkunat, ilmanvaihtokanavat sekä tulisijat hormeineen.

Neutraaliakselin alapuolella sisätiloissa on paine-ero ulkoa sisällepäin, neutraaliakselin yläpuolella paine-ero on sisältä ulospäin.



Kuva 2. Savupiippuilmion aiheuttamat painesuhteiden vaikutus rakennuksessa.

Savupiippuvaikutuksen aiheuttamat paine-erot ovat pieniä tuulen aiheuttamiin paine-eroihin verrattuna, mutta koska ne ovat pitkäaikaisia, niillä on kosteusteknisesti merkitystä. Mikäli huoneen yläosassa olevassa höyrynsulussa on vuotoja tai reikiä, voi sisäilma siirtyä rakenteisiin ylipaineen vuoksi, ja näin sisäilman kosteus voi aiheuttaa kosteusvaurioita.

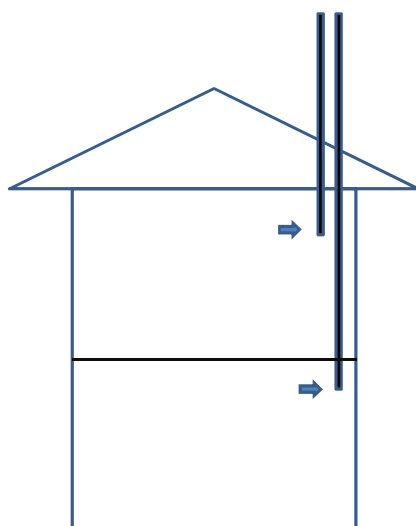
4 Rakennuksen sisäilmaan vaikuttavia tekijöitä

4.1 Painovoimainen ilmanvaihto

Painovoimainen ilmanvaihto perustuu sisä- ja ulkoilman välillä olevaan paine- ja lämpötilaeroon sekä tuulen vaikutukseen (35). Molemmat suureet vaihtelevat jatkuvasti. Sisätilan lämpimämpi ja kevyempi ilma pyrkii nousemaan hormoneja ja

pystykuiluja pitkin ylöspäin, jolloin kylmempää ja painavampaa ulkoilmaa alkaa virrata tilalle. Tehokkaimmin ilma vaihtuu talvella, koska lämpötilaero sisä- ja ulkoilman välillä on suurimmillaan (35).

Rakennuksen sisäpuolella tapahtuvat ilmavirtaukset myös vaihtelevat jatkuvasti. Mikäli asunnossa ei ole käytön kannalta riittävän suuria ulkoilmareittejä esim. ikkunakarmin yläosassa tai poistoilmareitit eivät toimi suunnitellusti esim. epätiiviyksien, likaisuuden tai venttiileiden tukkimisen vuoksi, on epäpuhtauksien kulkeutuminen ja kerääntyminen huoneilmaan todennäköistä.



Kuva 3. Painovoimaisen ilmanvaihtojärjestelmän toimintaperiaate.

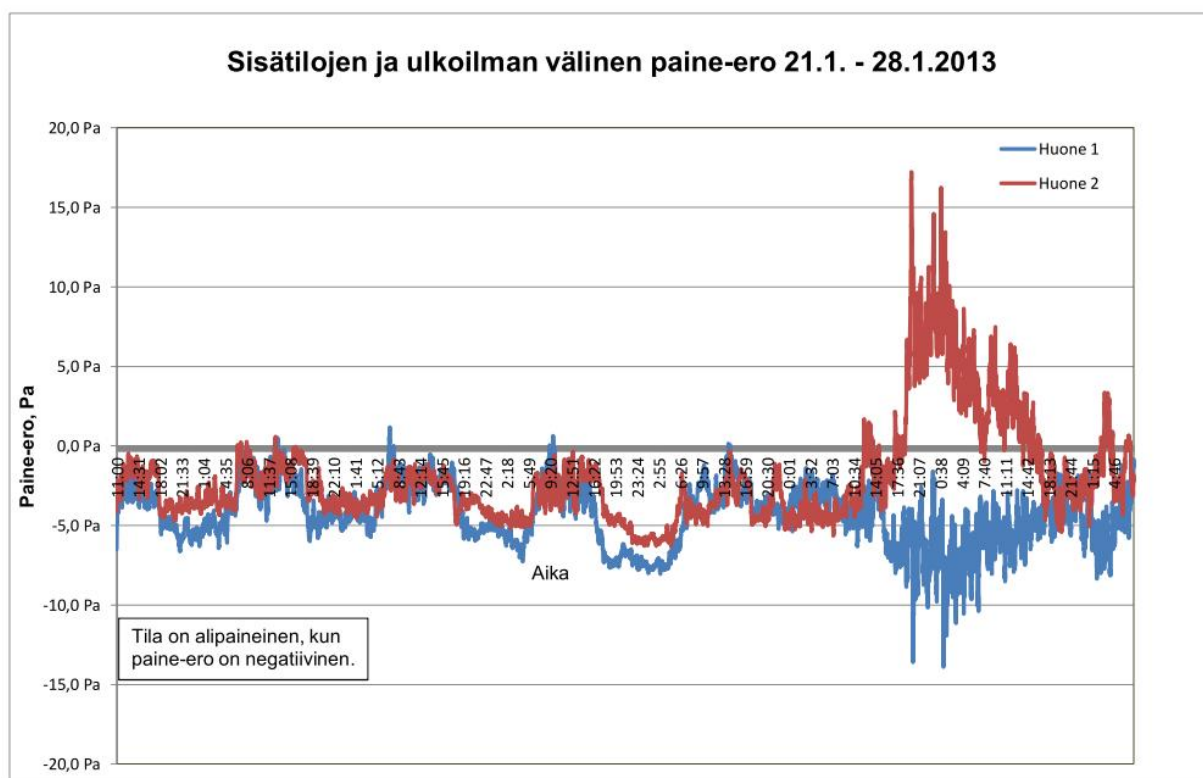
4.2 Koneellinen ilmanvaihto

Suomalaisissa rakennuksissa on useimmiten ainakin koneellinen poistoilmanvaihto, uusissa rakennuksissa sekä tulo- että poistoilmanvaihto ovat koneellisia. Koneellisessa tuloilmanvaihdossa raitis ilma kulkee tuloilmasäleikön ja suodattimen kautta putkia myöten edelleen jaettavaksi huonetiloihin. Tulo- ja poistoilmavirrat tasapainotetaan niin, että rakennus on lievän alipaineinen ulkoilmaa vasten (36). Savupiippuilmion vuoksi rakennuksen yläosa on yleensä ylipaineinen, myös pientaloissa. Tämä kuitenkin korostuu esim. huonekorkeudeltaan suurissa teollisuushalleissa sekä korkeissa rakennuksen sisäisissä pystykuiluissa.

4.3 Rakennuksen painesuhteiden tarkkailu

Rakennuksen painesuhteet saattavat vaihdella huomattavasti eri painesuhteisiin vaikuttavien tekijöiden johdosta sekä ilmanvaihtolaitteiden käyntiajat vaihtelevat. Rakennuksen ilmanvaihtojärjestelmä ja ilmanvaihtokoneiden sijainti palvelualueineen on syytä kartoittaa jo ennakkoon mittauksia suunniteltaessa. Rakennuksen ilmanvaihtokoneiden käyntiajat vaihtelevat yleisesti pääsääntöisesti niin, että yöllä ja viikonloppuna ilmanvaihto on säädetty pienemmälle.

Rakennuksen sisäilmaan vaikuttavien painesuhteiden tarkkailuun soveltuvat kiinteät paine-eromittarit. Nämä voidaan asentaa paikalleen esim. kahden viikon ajaksi, jotta tutkimuksen aikana vallitsevista painesuhteista saadaan luotettava kuva. Paine-eromittareiden asentaminen tulee suunnitella huolella, ja asentamisessa tulisi huomioida rakennuksen eri sivustoilla tuulen mukaan vallitsevat painesuhteet jo alusta alkaen. Mikäli esim. tarkkailujakson aikana puhaltaa tuuli vain yhdestä ilmansuunnasta, saattaa koko mittaus kyseisellä rakennuksen sivustalla olla epäluotettava, ts. painesuhdemittaukset voivat jatkuvan tuulisuuden perusteella osoittaa suurehkoa yli- tai alipainetta, vaikka todellisuudessa rakennuksen käytön normaalitilanne voi olla täysin päinvastainen. Näin ollen mittareita tulisi asentaa tasaisesti rakennuksen eri puolille ja käyttää riittävän pitkää tarkasteluaikaa, jotta painesuhteista saadaan luotettava kuva. Kuvassa 4 on viikon kestoinen tarkkailujakso, jossa jakson loppupuolella tuulen vaikutuksesta rakennuksen toinen puoli on ollut ylipaineinen, kun taas toinen puoli on ollut alipaineinen.



Kuva 4. Paine-eromittaus eräässä helsinkiläisessä kolmikerroksisessa rakennuksessa. Huoneet 1 ja 2 sijaitsevat vallinneeseen tuuleen nähden eri julkisivuilla. Tulokset on keskiarvostettu 10 min keskiarvoiksi, mittaus on tapahtunut minuutin välein.

4.4 Ilmanvaihtojärjestelmä osana terveellistä sisäilmaa

Toimiva ja huollettu ilmanvaihtojärjestelmä poistaa asuntojen sisäilmasta epäpuhtauksia, kosteutta ja liiallista lämpöä. Epäpuhtaudet voivat olla ihmisperäisiä tai rakennuksen eri toiminnoista aiheutuvia epäpuhtauksia, rakennuksessa käytettyjen materiaalien päästöjä (emissioita) tai peräisin maaperästä (31). Yhtenä epäpuhtauksien lähteenä toimii ihmiselimistö, josta solujen aineenvaihduntatuotteena tulee hiilidioksidia sisäilmaan.

Ihmisen terveydelle haitalliset epäpuhtaudet rakennetussa ympäristössä siirtyvät useimmiten ihmiselimistöön ilmaitse. Ihminen hengittää päivässä 15000 litraa ilmaa (24).

Laadukkaan sisäilman toteuttamiseksi esimerkiksi hiilidioksidipitoisuus ei saa olla liian suuri, ja tunkkaisuuden estämiseksi ei hiilidioksidipitoisuus saisi olla yli 2160 mg/m³ (1200 ppm).

Haitallisen aineen pitoisuus sisäilmassa on ratkaiseva tekijä rakennuksen käyttäjien oireilun kannalta. Pitoisuuteen vaikuttaa huomattavasti ilmanvaihtojärjestelmä ja epäpuhtauden kulkeutuminen sisäilmaan. Hajukynnys saattaa ylittyä hyvinkin pienestä määrästä epäpuhtautta, esimerkiksi eräillä paperitehdaspaikkakunnilla havaittavan metyyliimerkaptaanin hajukynnys on 0,008 ppm (33).

Mikäli rakennuksen sisäilmaan vaikuttaa jokin epäpuhtaus, normaalitilassa oleva ilmanvaihto ei useinkaan riitä epäpuhtauksien pitoisuuden alentamiseen sisäilmasta.

Ilmanvaihdon liiallinen lisääminen vaikuttaa myös vedon tunteen lisääntymiseen ja sisätilojen liialliseen kuivumiseen ulkolämpötilojen ollessa alle -5°C. (31.)

Ilmanvaihdon aikaansaama ilmanvaihtuvuus tulisi olla 0,5 1/h, eli puolet ilmamäärästä tulisi vaihtua tunnin tarkastelujakson aikana.

Ilmanvaihdon pitää toimia, vaikka huoneisto olisi tilapäisesti tyhjillään (31).

Suosittelava tapa on sisätiloihin kulkeutuvan epäpuhtauden kulkeumareitin luotettava selvittäminen ja epäpuhtauden poistaminen tai ilmajäljien kulkeuman perusteellinen estäminen. Tähän ovat apuna merkkiainekokeet, joiden perusteella saadaan esille reitti, jota pitkin epäpuhtauden leviäminen sisäilmaan on todennäköistä.

4.5 Sisäilman epäpuhtauksista, terveyshaitat

Oireita, jotka on liitetty asunnossa todettuun terveyshaittaan, ovat Asumisterveysoppaan (11.) mukaan mm.

- silmien, ihon ja hengitysteiden limakalvojen ärsytysoireet
- nenän tukkoisuus ja nuha
- äänen menettäminen, äänen käheys
- yskä ja limannousu keuhkoista
- toistuvat nenäverenvuodot
- hengenahdistus ja hengitysvaikeudet
- selittämätön kuumeilu

- päänsärkyä
- väsymystä ja pahoinvointia.

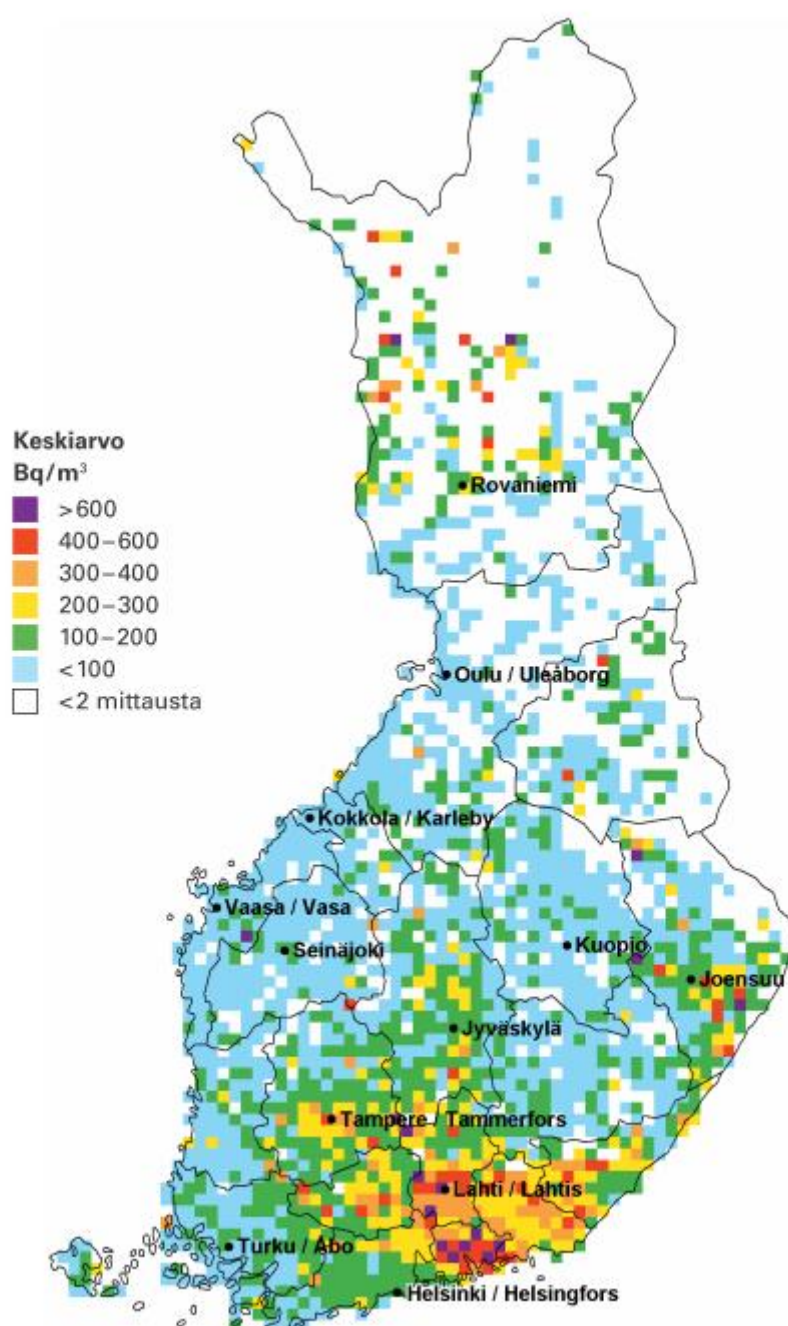
Oireiluun vaikuttavat Sisäilmayhdistyksen (10.) mukaan ainakin seuraavat tekijät:

- altisteen laatu
- pitoisuus
- altistumisajan pituus
- yksilölliset tekijät, mm.
perintötekijät
ikä (lapset/aikuiset)
hengitystiesairaudet
muut sairaudet
aikaisempi altistuminen kosteusvauriomikrobeille.

4.6 Radon-turvallisuus

Suomi kuuluu maaperältään radioaktiivisen, uraanin hajoamistuotteena syntyvän radon-kaasun riskialueisiin. Maaperässämme on alueittain runsaasti radonia, ja kaikki radonin isotoopit ovat radioaktiivisia. Radonin kulkeutuminen asuntojen sisäilmaan tulee estää.

Osaltaan rakennuksen alipaineisuus edesauttaa radonin siirtymistä maaperästä asuintilojen ilmatilaan, osaltaan taas ulko- ja sisälämpötilojen välinen lämpötilaero. Kuitenkin radonin aiheuttaman terveyshaitan ehkäisemiseksi rakennusten maanvastaisiin rakenteisiin on kiinnitettävä huomiota, asentamalla maanvaraisen laatan alle radonin keräysputkisto esimerkiksi salaojaputkista ja radonkaistoin. Rakennuksen rakentamisvaiheessa toteutettu radon-suojaus tulee erittäin halvaksi verraten tilanteeseen, jossa valmiiseen rakennukseen joudutaan tekemään radon-korjauksia ja rakenteiden tiivistyksiä. Yleensä tästä ei selvitä ilman pintarakenteiden purkamista.



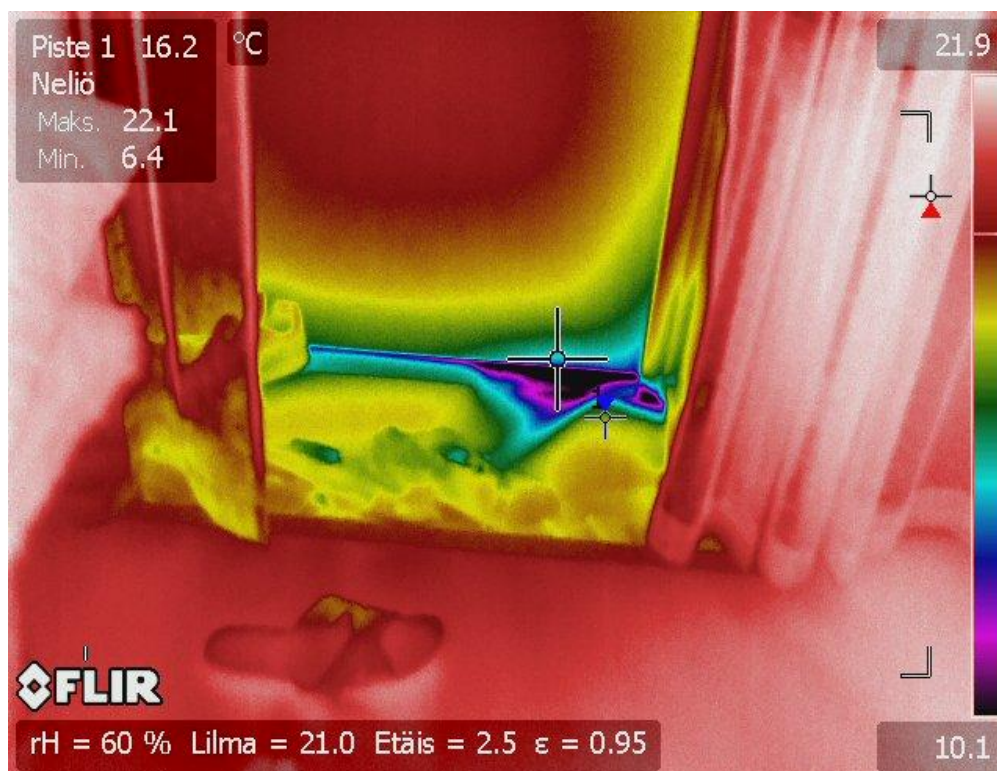
Kuva 5. Radonpitoisuus pientaloasunnoissa. Ruudun koko 10 x 10 km.

Kuva: © Säteilyturvakeskus.

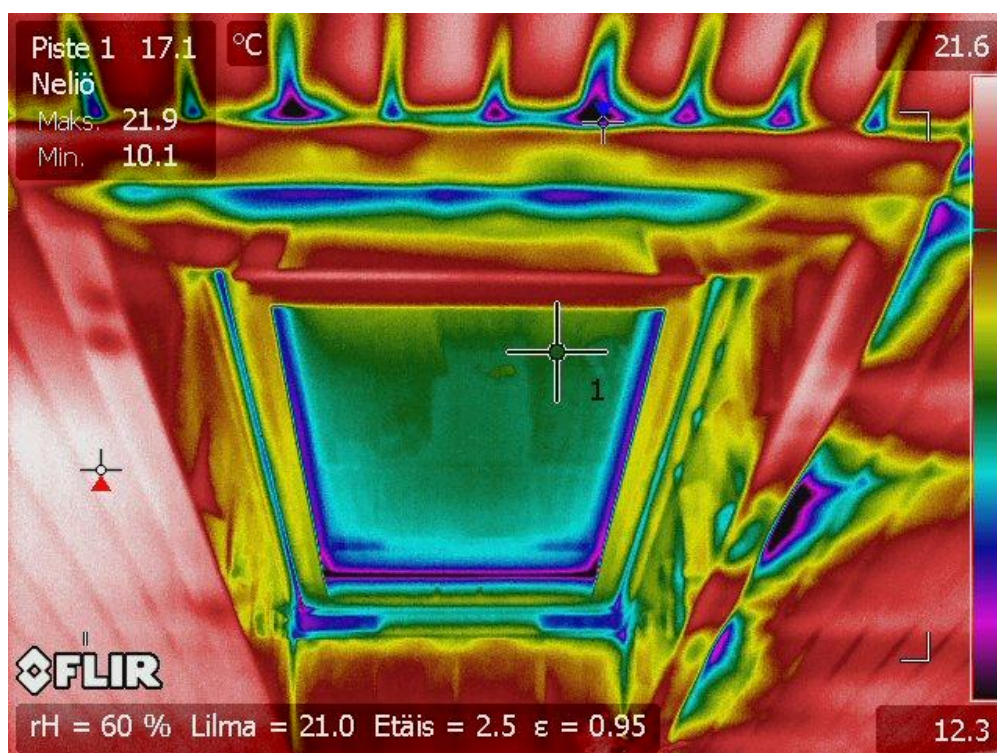
4.7 Ilmavuodot käytännössä

Ilmavuodot rakenteen läpi aiheuttavat kosteusteknisen riskin. Ilman sisältämän vesihöyryn hallitsematon siirtyminen rakenteisiin aiheuttaa riskin. Merkkiainekokeet ja lämpökamerakuvaus tarjoavat lähestymistapoja ilmavuotojen osoittamiseen rakennuksessa.

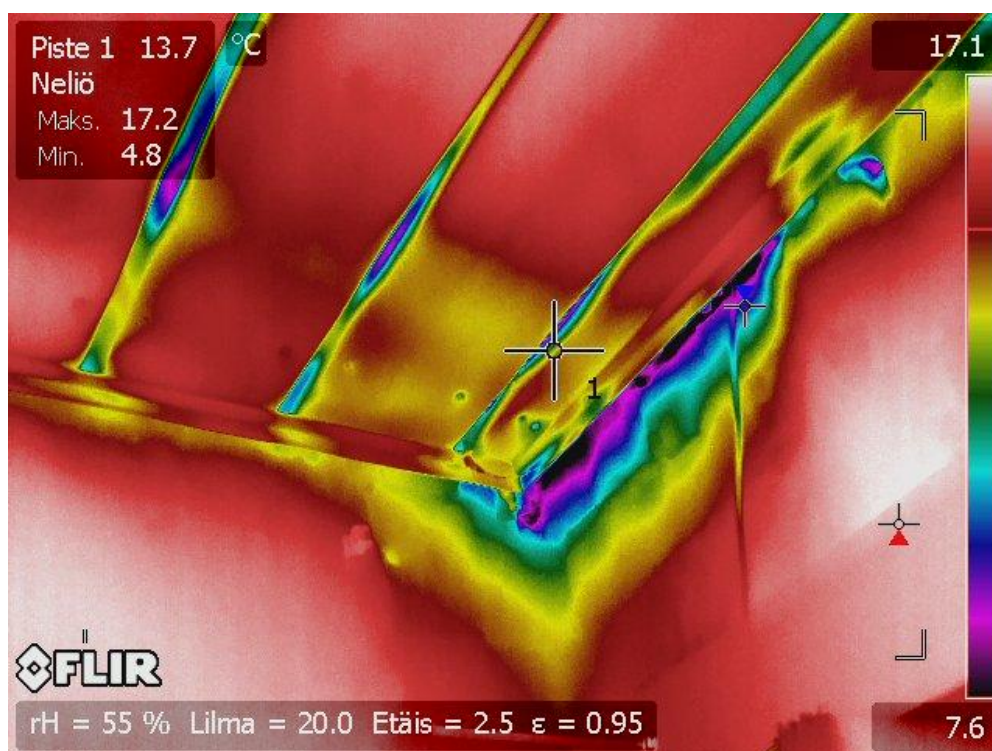
Lämpökuvauksen ajankohta sijoittuu luotettavien tulosten saamiseksi yleensä rakennusten lämmityskaudelle, noin marraskuulta huhtikuulle. Näin saavutetaan riittävä lämpötilaero ilmavuotojen paikallistamiseksi (36). Myös tutkittavan tilan alipaineistaminen helpottaa lämpökamerakuvausten toteuttamista ja mahdollinen vuotoilma vaikuttaa mitattavan kohteen pintalämpötilaan (34). Lämpökamerateknologia on myös työnaikaiseen laadunvalvontaan hyvä apuväline, ja varsinkin kameroiden hintojen halpeneminen on edesauttanut lämpökuvauksen laajempaa hyödyntämistä. Tarkemmin lämpökuvausta käsitellään Markus Immosen (34) ja Tapani Järvenpään (38) opinnäytetöissä. Kehittyneillä kameroilla saadaan myös pistemäisesti mitattua kohdetta tutkittaessa halutun kohdan lämpötila, ja tämä tulos voidaan edelleen tallentaa laitteen muistiin. Näin saadaan dokumentti mittauksista. Kuvat 6,7 ja 8 ovat osoittamassa lämpökameroiden hyödyllisyyttä lämpövuotojen ja kylmäsiltojen kartoituksessa rakennusta tutkittaessa.



Kuva 6. Lämpökameran kuva ilmavuodosta ja lämpötilan mittaus.



Kuva 7. Lämpökameran kuva ilmavuodosta ja lämpötilan mittaus. Ikkuna.



Kuva 8. Lämpökameran kuva ilmavuodosta ja lämpötilan mittaus. Seinärakenne.

4.8 E-luvun laskenta, vaipan ilmatiiviys ja määräykset 2012

1.7.2012 voimaan tulleet Ympäristöministeriön D3-osan määräykset rakennusten energiatehokkuudesta painottavat vaipan ilmatiivyyttä ja energiatehokkuutta. Rakennusten energiansäästöä silmälläpitäen rakennusvaipan ilmatiivyyteen on ruvettu kiinnittämään erityistä huomiota. Uudisrakennusten ilmanpitävyysmittauksia tehdään runsaasti ja jo säännönmukaisesti, jotta saavutetaan haluttu korkeampi energialuokka. Mikäli ilmanpitävyysmittauksia ei toteuteta, turvaudutaan teoreettisiin laskelmiin ja lasketaan teorian mukainen energialuokka, joka on usein selvästi alempi kuin mittauksilla todettu energialuokka.

Rakennusvaipan ilmanpitävyyttä käsitellään erikseen ja sille annetaan selkeitä raja-arvoja. ”Sekä rakennusvaipan että niiden välisten tilojen tulee olla niin ilmapitäviä, että vuotokohtien läpi tapahtuvat ilmavirtaukset eivät aiheuta merkittäviä haittoja rakennuksen käyttäjille, rakenteille tai rakennuksen energiatehokkuudelle. Erityistä

huomiota tulee kiinnittää rakenteiden liitosten ja läpivientien suunnitteluun sekä rakennustyön huolellisuuteen. Rakenteisiin on tarvittaessa tehtävä erillinen ilmansulku” (5).

Rakennusvaipan ilmanvuotoluku q_{50} saa olla enintään $4 \text{ (m}^3/\text{h m}^2\text{)}$, ja tätä lukua käytetään E-luvun laskennassa ja energiatehokkuuden todentamisessa, ellei vaipan ilmatiiviyttä osoiteta mittaamalla (5). Käytännössä tämä kuitenkin tarkoittaa, että kaikkien uudisrakennusten ilmatiiviyys osoitetaan mittaamalla, ja tämä asettaa vaatimuksia rakennustyön huolellisuudelle rakennushankkeen aikana.

Kosteusteknisen turvallisuuden, hyvän sisäilmaston ja energiatehokkuuden kannalta tulisi rakennusvaipan ilmanvuotoluvun q_{50} olla enintään $1 \text{ m}^3 / \text{h m}^2$ (rakennuksen vaipan neliön läpi virtaa ilmapirta yksi kuutio tunnissa sisä- ja ulkoilman välisen paine-eron ollessa 50 Pa) (6).

Ilmavuotojen erillisellä tarkastelulla on kuitenkin positiivinen vaikutus uudisrakentamisen laatuun, ts. vaipan ilmanpitävyyteen kiinnitetään erikseen huomiota. Pitkällä aikavälillä tarkasteltaessa tällä ehkäistään kosteusvaurioita, jotka aiheutuvat hallitsemattomista, suunnaltaan vaihtelevistakin ilmavuodoista.

4.9 Ilmanpitävyysmittaus

Rakennuksen ilmanpitävyysmittaus tehdään standardin SFS-EN 13829 mukaisesti muodostamalla puhaltimella 50 Pascalin alipaine tutkittavaan huoneistoon. Mittalaitteisto on useimmiten automatisoitu. Mittaus valmistellaan teippaamalla kaikki ilmanvaihtokanavat tiiviisti umpeen, tiivistämällä hormit ilmanpitäviksi ja täyttämällä viemäreiden vesilukot. Ulko- ja sisäilman välistä paine-eroa tarkkaillaan ja mitataan puhaltimelle menevä ilman tilavuusvirta. Saatu tilavuusvirta R_{50} jaetaan huoneiston tilavuudella $n_{50} = R_{50} / V$, ja tästä saadaan ilmanvuotoluku.

Ilmanvuotoluku voidaan laskea myös vaipan pinta-alaa kohden (q_{50} - luku), jolloin tilavuusvirta jaetaan vaipan pinta-alalla (mukaanlukien ala- ja yläpohja)

$$q_{50} = R_{50} / A_{\text{vaippa}}$$

Rakennusvaipan vuotoilmamäärä lasketaan kaavalla

$$qv, \text{ vuotoilma} = \frac{q_{50}}{3600 \cdot x} * \text{Avaippa}$$

q_{50} on rakennusvaipan ilmanvuotoluku

Avaippa on rakennusvaipan pinta-ala m^2

x on kerroin, joka on yksikerroksisille rakennuksille 35, kaksikerroksisille 24, kolmi- ja nelikerroksisille 20 ja viisikerroksisille ja korkeammille rakennuksille 15.

3600 on kerroin, joka muuttaa ilmavirran m^3/h yksiköstä m^3/s yksikköön. (5.)

4.10 Merkkiainekokeet

Merkkiainekokeita voidaan toteuttaa haluttaessa tietoa rakenteen tai rakennusosan ilmatiivyydestä tai ilman kulkeutumisesta rakenteissa. Myös työmaa-aikainen, alipaineisen osastoinnin laadunvalvonta suuremmissa korjauskohteissa on yksi sovelluskohde. Asuntojen välillä leviävien epäpuhtauksien kulkeumareitit saadaan myös osoitettua luotettavasti merkkiainekokeilla, ja esimerkiksi kerrostaloissa väärin säädetty ilmanvaihdon lämmöntalteenotto voi siirtää tupakansavua asuntojen välillä.

Merkkiainekokeita tehtäessä päästetään tutkittavaan rakenneosaan tai rakenteeseen kaasua, ja tämä kaasu toimii merkkiaineena. Merkkiaineena käytetään useimmiten puhdasta rikkiheksafluoridia tai vety-typiseoskaasua.

Merkkiainekokeita tehtäessä tulisi huomioida, että erityisesti höyrynsulkumuovilla varustettuihin, kevytrakenteisiin levyseiniin ei tulisi porata reikiä rakenteen sisäpuolelta.

4.11 Rakennuksen sisällä tapahtuva epäpuhtauksien leviäminen

Epäpuhtautta sisältävä ilmavirtaus useimmiten syntyy, kun asunto on alipaineinen epäpuhtautta sisältävään tilaan nähden ja rakenteessa on ilmanvuotokohtia. Vuotokohdat sijaitsevat usein putkistoläpivienneissä ja rakenteiden liitoskohdissa (11). Varsinkin epätiivit alapohja-ulkoseinäliittymät voivat toimia korvausilmareittinä. Betoni- ja tiilirakenteisiin syntyneet suuremmat halkeamat voivat toimia yhtenä reittinä

epäpuhtauksien kulkeutumiselle. Myös huonokuntoiset, epätiivit kittisaumat tai epätiivisti vaahdotettu polyuretaanieriste toimivat reitteinä epäpuhtauksien siirtymiseen sisäilmaan.

Myös rappukäytävä tai ilmanvaihtohormi voi toimia reittinä epäpuhtauksien kulkeutumiselle. Varsinkin korkeissa rakennuksissa tilojen välinen paine-ero saattaa olla hyvinkin suuri, ja tämä mahdollistaa epäpuhtauksien kulkeutumisen alapuolisten kerrosten tiloista ylempien kerrosten sisätiloihin. Joissain tapauksissa jopa kellarikerroksen kosteusvaurio on ensimmäisenä havaittu rakennuksen ylimmässä kerroksessa asukkaiden oireiluna. Myös esimerkiksi tupakansavun leviäminen kerrostaloissa yhdestä asunnosta seuraavaan on mahdollista väärin säädetyssä poistoilman lämmöntalteenottolaitteistossa.

4.12 Rakenteiden tiivistystyö

Rakenteiden tiivistystyössä pyritään katkaisemaan ilmayhteys ja konvektiovirtaus epäpuhtauden lähteestä sisäilmaan.

Tiivistystyön soveltuvuus korjaustavaksi tulisi aina selvittää kohdekohtaisesti, sillä esimerkiksi puurunkoisissa, levyrakenteisissa ulkoseinissä on usein runsaasti epätiiviyksiä ja tiivistystyö saattaa olla haastavaa. Myös rakennuksen ikkunoiden ja niiden liitosten kunto saattaa vaihdella huomattavasti, ja merkkiainekokeilla saadaan kohdekohtainen varmuus tiivistystyön mahdollisuuksista.

Betonirunkoisessa rakennuksessa ilmatiiviys on yleensä hyvä, kuten myös teollisesti valmistetussa ja huolellisesti kootussa hirsirakennuksessa (25). Betoniseinien mahdollisten halkeamien ja epätiivien saumojen tiivistäminen sekä rakenteen korjaaminen on työteknisesti ja kustannuksellisesti sekä helppoa että järkevää.

Esimerkiksi ulkoseinän tiivistystyössä (Kuva 9) pyritään katkaisemaan ilmayhteys ulkoseinän eristetilasta, jotta mikrobitoiminnan aiheuttamat hiukkas- ja kaasumaiset epäpuhtaudet eivät siirry sisäilmaan. Tämän toteuttamiseksi kaikki ulkoseinän halkeamat, patterikannattimet, sähkö- ja putkiläpiviennit sekä elementtien saumat tiivistetään ilmanpitäviksi.



Kuva 9. Betonirakenteiden tiivistystyö, suunnittelun pohjaksi on toteutettu merkkiainekokeet. Myös sähköläpiviennit voivat toimia epäpuhtauksien kulkeumareittinä.

Rakenteiden tiivistystyössä tulisi aina käyttää tähän tarkoitukseen suunniteltuja, tutkitusti toimivia tuotteita, eikä esim. silikonikitillä saavuteta kunnollisia tuloksia, sillä kittisaumoista epäpuhtaudet vuotavat helposti sisäilmaan ja kittisauman tiiviys on usein hyvin lyhytaikaista.

Kosteusvauriokorjaukset sekä tiivistystyöt ovat haastavia, sillä vauriokohteet ovat aina yksilöllisiä. Useimmiten kosteusvaurion taustalla on monen erillisen vian aiheuttama kokonaisuus. Suuremmissa kohteissa kosteusvaurio voi olla erittäin suuren rakennuskokonaisuuden pieni osa, ja tiivistystyöllä voidaan myös saada lisää aikaa esimerkiksi raskaampaa peruskorjausta odoteltaessa. Kosteusvauriokorjaus tulisi toteuttaa alipaineistuksella esimerkiksi Ratu TT09-0096-ohjeen mukaisesti, jotta rakenteita avattaessa ilmaan leviävät epäpuhtaudet eivät pääse leviämään puhtaampiin tiloihin.

4.13 Rakenteiden kapselointi

Rakenteiden kapseloinnilla pyritään saamaan aikaiseksi diffuusiotiivis rakenne. Haitta-ainetta voi olla vain rajallisella, pienellä alueella, jolloin sen poistaminen tai edelleen kapselointi diffuusiotiiviisti voi tulla kysymykseen. Haitta-aine voi sijaita myös kantavissa rakenteissa ja tällöin rakenteen purku voi osoittautua erittäin työlääksi. Haitta-aineen lähde voi olla esimerkiksi kreosoottia sisältävä maanvaraisen laatan alustäyttö. Kreosootti on voinut imeytyä esimerkiksi ympäröiviin betoniseiniin, ja näiden seinien purku ei ole aina mahdollista. Haitta-aineiden suhteen (esim. kreosootti) esiintymät ovat yleensä rajallisempia kuin kosteusvaurioissa, ja luotettavan haitta-aineselvityksen pohjalta tehtävät työt on helpompi toteuttaa.

Myös rakennushistoriallisesti merkittävässä, suojelluissa kohteissa kreosoottia saattaa esiintyä laajaltikin. Tällöin epäpuhtauksia sisältävä rakenne voidaan kapseloida katkaisemalla ilmayhteys diffuusiotiiviisti sisäilman ja haitta-aineen välillä. Tähän on käytettävissä erilaisia, tutkittuja epoksihartsipohjaisia järjestelmiä.

Kapselointi menetelmänä on vasta kymmenisen vuotta käytetty, mutta siihen on saatavissa monia eri epoksipohjaisia aineita rakennustuotevalmistajilta. Esimerkiksi Ardexin EP2000- epoksituotteella saavutetaan tutkitusti radonin suhteen diffuusiotiiviyys 100 h tarkasteluajana (37). Esimerkiksi kipsilevy ei ole radon-tiivis (37). Kapselointi vaatii kokemusta menetelmän toimivuudesta jokaiseen tarkasteltavaan kohteeseen sekä etukäteissuunnittelun.

5 Kirjallisuusselvitys ja laitteiston tekninen tarkastelu

5.1 Haku Internetistä ja tietokannoista

Internetin eri hakupalveluista etsittiin mm. merkkiaine, merkkiainekoe, ilmatiiviyys ja ilmavuoto, hydrogen leak, sulphur/sulfur hexafluoride leak -hakusanoilla sopivia lähteitä, tutkimuksia ja opinnäytetöitä. Haut suoritettiin [Metcat](#), [Theseus](#), [Helka](#) tietokannoista sekä [Aalto-yliopiston](#) tietokannoista ja [Google Scholar](#) palvelussa.

Rakennustekniset artikkelit lähestyivät ilmavuodon mittausta useimmiten lämpökamerateknologiaa hyödyntäen, ja ilmavuotojen tarkastelussa lämpökamera on erittäin yleisesti käytetty työväline. Lämpökamerateknologian yleistymistä edesauttaa laitevalmistajien tuotekehitys ja laitteiden hintojen halpeneminen. Tämä mahdollistaa laajemman työnaikaisen lämpökameroiden hyödyntämisen.

Vetykaasua käytetään merkkiaineena vuotojen tutkimiseen esim. polttoainejärjestelmissä sekä mm. Ariane-raketin moottorijärjestelmässä (21). Vetykaasulaitteistoa käytetään myös esim. energiavoimalaitoksen turbiinijärjestelmän mahdollisten vuotojen tutkimiseen (22) ja erilaisten boilerijärjestelmien vuotojen tutkimiseen (23). Ruotsalaista Sensistor-mittalaitteistoa käytetään myös ilmaisemaan vuotoja maan alla olevissa vesijohtoputkissa.

Rikkiheksafluoridilaitteistoa on käytetty Yhdysvalloissa hiilikaivosten tutkimisessa mm. mallintamaan kaivoksen ilman kulkeutumista eri kaivoksen osien välillä ja tulipalojen vaikutusten suunnitteluun kaivoksen henkilöevakuointia silmälläpitäen (19). Rikkiheksafluoridia käytetään myös sähköverkon jakelulaitteissa korvaamaan ilmaa rikkiheksafluoridin matalan sähkönjohtavuuden vuoksi (39).

Rikkiheksafluoridin terveysvaikutuksia on tutkittu, ja sen on todettu olevan inertti kaasu rotille sekä ihmisille (20). New Jersey'n Terveys- ja Vanhusviraston (*New Jersey Department of Health and Senior Services*) tiedotteen mukaisesti se voi kuitenkin aiheuttaa monenlaisia terveydellisiä ongelmia, aina fluoroosi-nimiseen terveydelliseen myrkytystilaan asti (32).

Aga Oy:n käyttöturvallisuustiedotteen mukaan rikkiheksafluoridikaasu on myrkytön, mutta korkeina pitoisuuksina tukahduttava, hapen syrjäyttävä kaasu. Kaasun hengittämistä on vältettävä. Mahdollinen nestekontakti saattaa aiheuttaa paleltumavammoja ja kaasun aiheuttama tukehtumisen vaara on huomioitava käyttäjäkoulutuksessa (16).

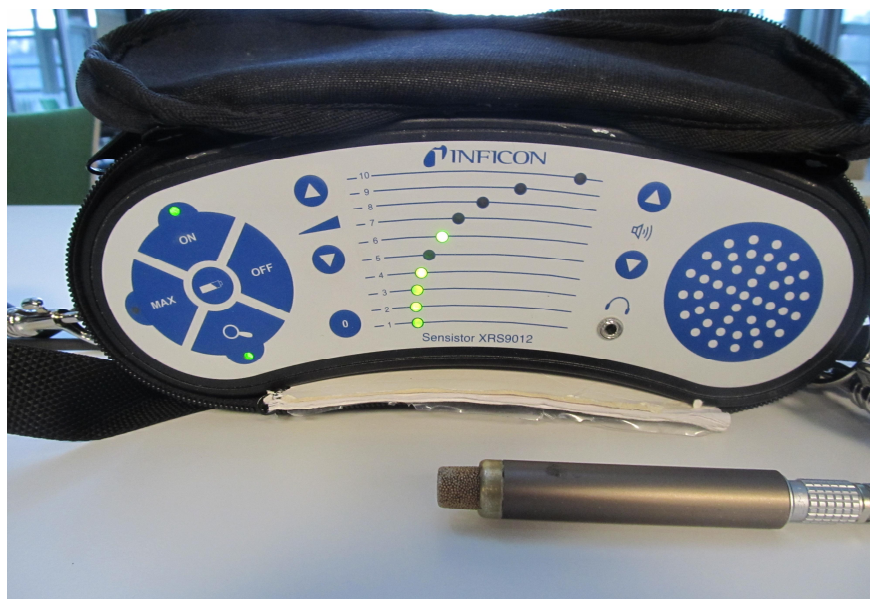
5.2 Tarkasteltavien merkkiainekoelaitteistojen kaasu

Käytettävät kaasuseokset ovat Sensistorin laitteistolle tilavuusprosenttiltaan 5% vety-95% typpikaasuseos sekä Innovan kaasuanalysointilaitteistolle 99,97%:sti puhdasta rikkiheksafluoridikaasua. Rikkiheksafluoridi on yli kaksi kertaa kalliimpaa kuin vetytyppiseos.

5.3 Laitteistot, Sensistor XRS9012

Laitteisto on kannettava, akkukäyttöinen Sensistor XRS9012 - kaasunilmaisin. Laitteisto näkyy kuvissa 10 ja 11. Laitteistoon kuuluu itse kaasunilmaisinmittalaite sekä H21-mitta-anturi 3 m johtoineen. Mitta-anturin johtoa saa aina 9 m pituuteen saakka. Latauslaite kulkee laitteen kantolaukun mukana.

H21-anturin toiminta perustuu laitevalmistajan ilmoituksen mukaan mosfet-periaatteen mukaisesti toimivaan kerrokseen, jonka läpi vain puhtaat vetykaasumolekyylit pääsevät läpi. Läpikässeet vetymolekyylit aiheuttavat sähkövirran, jota kaasunilmaisin vahvistaa. Laite ei ole herkkä hiilivedyille tai kaasuille, kosteudelle tai lämpötilalle. Laite antaa sekä äänellisen että led-valojen määrään perustuvan tuloksen, havaitaanko vetykaasun olemassaoloa tutkittavasta ilmanäytteestä. Laitteen herkkyydelle on kymmenportainen asteikko, jolla voidaan esim. havainnoida havaitun vetykaasun kaasumäärän suuruutta ja merkitsevyyttä.



Kuva 10. Sensistor XRS 9012 -laite ja mitta-anturi. Laitteen herkkyys on kuvassa asetuksella 6 ja laite on havainnut vetykaasua anturin läheisyydessä.

Laite pystyy havaitsemaan alkaen 0,7 ppm pitoisuudet vetykaasua. Ilmakehässä merenpinnan lähellä on 0,5 ppm vetykaasua. Vety on ilmakehässä havaittavista kaasuista kaikkein kevein, ja vetymolekyylit (H_2) liikkuvat paljon suuremmalla nopeudella kuin raskaammat molekyylit, joten ne pakenivat vuotokohdista paljon nopeammin kuin muut kaasut. Vetykaasu myös hajoaa nopeammin kuin muut kaasut, ja siten vedyn käyttäminen merkkiainekaasuna minimoi mittauksen aikana tapahtuvan vedyn taustapitoisuuden nousun aiheuttaman häiriön mittauksiin (18).

Sensistor Oy:n käyttämällä laitteistolla käytetään merkkiainekaasuna vedyn ja typen seosta, jossa on 5 % vetyä. Tällöin kaasuseosta on myös turvallista käsitellä suljetuissakin tiloissa (ei-syttyvää huoneenlämmössä).



Kuva 11. Sensistor-laitteistolla mittaus. Kaasupullolta rakenneseosaan tai tutkittavaan tilaan menevä letku on korostettu nuolella ja kaasupullot asennetaan mieluiten tutkittavan tilan ulkopuolelle.

Vety on kaasumaisena erittäin helposti syttyvää ja sen 18-60-prosenttiset ilmaseokset ovat räjähtäviä. (14.) Vetykaasu on myös ilmastoystävällinen, myrkytön sekä uusiutuva kaasu. Laitteen käyttölämpötila on -20°C - $+50^{\circ}\text{C}$. Laitteen havainnointiaika vetykaasulle on alle 1 sekunti. Laite painaa kantolaukussaan 2,5 kg (30).

IP-järjestelmässä ensimmäinen luku kertoo laitteen suojauksen vieraita esineitä ja pölyä vastaan toisen numeron kertoessa laitteen suojauksesta vettä ja kosteutta vastaan. Sensistor -laitteisto on vesitiivis, suojausluokka on IP65 (Merkintöjen selitykset: 6 - Täydellinen suojaus. Pölytiivis. 5 - Kestää suurella paineella tulevan vesiruisun.)(29., 30.)

5.3.1 Laitteiston virhelähteet ja vikatilanteet

Laitteiston virhelähteitä määritettäessä anturi altistettiin eri kemikaaleille ja kaasuille. Anturia altistettaessa 99,97%:sti puhtaalle, kaasumaiselle rikkiheksafluoridille, laite rupesi ilmaisemaan virheellisesti vedyn olemassaoloa. Tätä esiintyi, kun anturi poistettiin rikkiheksafluoridin kaasuvirtauksesta. Tämän ominaisuuden ja virhenäyttämän johdosta merkkikaasukokeita ei voitu toteuttaa alkuperäisen suunnitelman mukaisesti, jolloin kaasut olisi päästetty samaan aikaan samaan tutkittavaan rakenneosaan samoissa täysin identtisissä olosuhteissa.

Sensistorin anturi reagoi myös ihmisen uloshengitysilmassa olevaan vetyyn, joka Sensistorin teknisen neuvonnan mukaan on peräisin ihmisen mahalaukusta. Myös tämä ominaisuus on otettava mitattaessa huomioon ja estettävä mittajaajan uloshengitysilman kulkeutuminen mittapäälle.

5.4 Rikkiheksafluoridilaitteisto, Innova 1412

Innova 1412 on kenttämittauksiin suunniteltu kaasuanalysointilaitteisto. Laite ottaa pumpun avulla ilmanäytteen ja analysoi sen fotoakustisella infrapunatunnistamisella. Laite pystyy tunnistamaan miltei mitä tahansa kaasua, joka absorboi infrapunasäteilyä (26.). Sen herkkyys rikkiheksafluoridin havaitsemiseen on 0,006 ppm. Kaasuanalysointilaitteisto ottaa pitoisuusmääritelmässä huomioon myös ilman vesihöyry- pitoisuuden ja muokkaa saatuja pitoisuustuloksia tämän perusteella. Innovan kaasuanalysointilaitteistolla saadaan numeroarvo, jonka perusteella voidaan varmuudella osoittaa esim. rakenneosasta sisäilmaan leviävät kaasumaiset epäpuhtaudet.

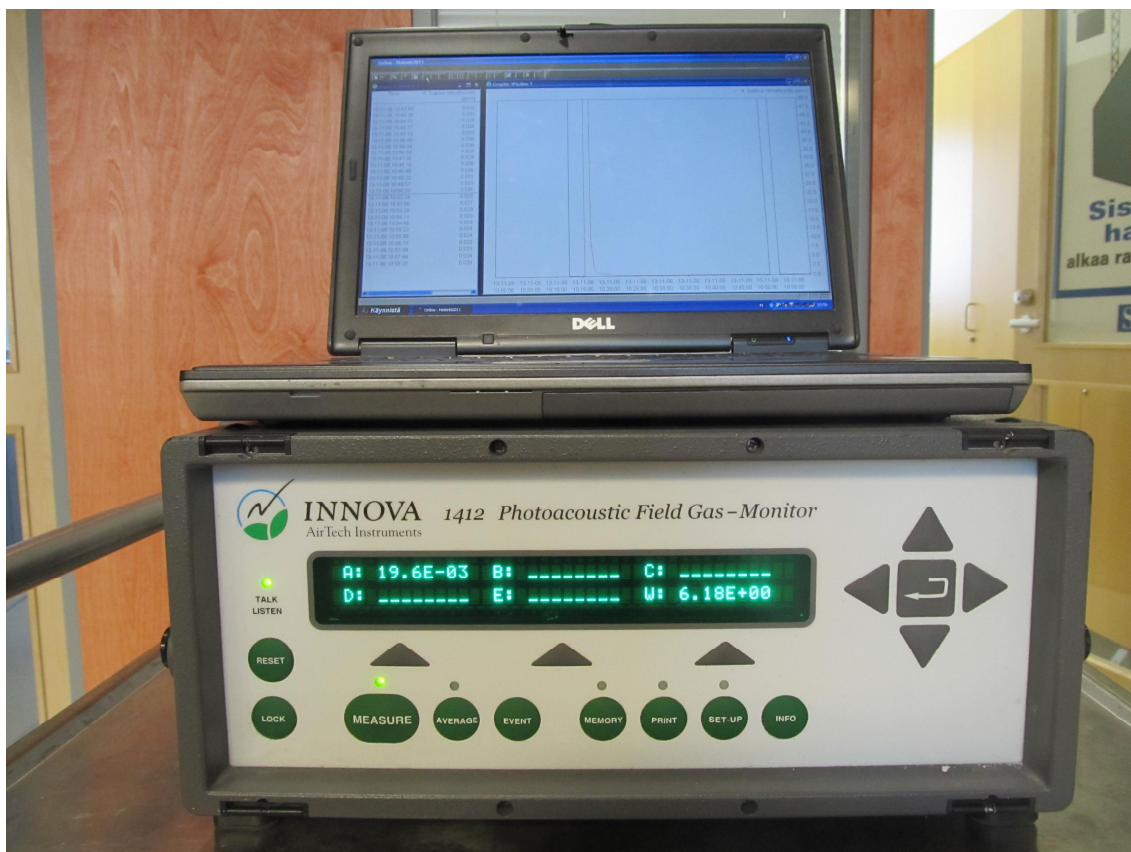
Laitteen käyttölämpötila on +5°C - +40°C. Laite vaatii jatkuvan sähkövirran. Laitteen havainnointiaika yhden kaasun pitoisuutta analysoitaessa on noin 25 sekuntia. Laite painaa 9 kg (26). Laite on tarkoitettu kuivien tilojen mittaamiseen, suojaluokka on IP20 (Merkinnän selitys: 2 - Suojaus keskikokoisia kappaleita vastaan, halkaisija yli 12,5 mm, 0 - Ei suojasta vettä vastaan.) (29, 26).

Laitteiston lävitse virtaava ilma suodatetaan suodattimella epäpuhtauksista laitteen takaosassa, ja tämä suodatin tulee puhdistaa määrävälein. Myös erittäin likaisessa paikassa työskentelyn jälkeen tulee laitteen suodatin puhdistaa.



Kuva 12. Innovan laitteistolla mittaamista. Kaasupullolta rakenneosaan menevä letku on korostettu nuolella ja kaasupullot asennetaan mieluiten tutkittavan tilan tai rakenneosan ulkopuolelle.

Laitteisto tulee kalibroida vuosittain valmistajan valtuuttamassa huollossa. Kaasuanalysaattoriin on kytketty kannettava tietokone, jonka Online-ohjelmalla voidaan mittausten aikana tarkkailla pitoisuuden kehittymistä. Online-ohjelma mahdollistaa myös mittausten tallentamisen tietokoneen kovalevyllä myöhempää tarkastelua varten, mutta mittaustulokset ovat luettavissa myös suoraan kaasuanalysaattorin etupaneelista.



Kuva 13. Innovan laitteiston näkymä. Kuvassa rikkiheksafluoridin kaasupitoisuus on 19,6 ppm.

Innovan järjestelmään kuuluvat kaasupullo putkistoineen, kaasuanalysaattori ja mahdollisesti myös tietokone, jolta pitoisuuksien seuraaminen käy luontevasti. Laitteiston liikuteltavuus on rajallinen, ja laite tarvitsee sähkön. Laitteiston kaasunanalysointiletku on kuitenkin jopa 5 m pitkä, joten korkeissa huonetiloissa mittauspään vieminen esim. yläpohjan alapintaan jatkovarren avulla on mahdollista.

5.4.1 Laitteiston virhelähteet ja vikatilanteet

Rikkiheksafluoridilaitteistolle voi tulla virhelukemia, mikäli ilmassa on suuri määrä kiinteitä epäpuhtauksia, jotka tukkivat mittauskanavaa. Mittauskanavan tukkeumisesta laite ilmoittaa välittömän virheilmoituksen. Myös suuri vesihöyrypitoisuus ilmassa voi häiritä mittauksia. Käytännön mittauksissa on havaittu, että esim. mittauspisteen vieressä tapahtuva parkkipaikan asfaltointi (suuri kaasumainen hiilivetypitoisuus) saattaa aiheuttaa virhelukemia ja epäluotettavia mittauksia.

6 Merkkiainekokeiden toteutuksesta

6.1 Työnaikainen laadunvalvonta

Kosteusvaurio- ja haitta-ainekorjauksia toteutetaan alipaineistuksella esimerkiksi Ratu TT09-0096-ohjeen mukaisesti. Tämä vaatii rakennus- tai korjaushankkeen tilaajalta sekä urakoitsijalta osaamista, jotta osastointi tulee toteutettua oikein. Kosteusvauriokorjauksia ei tulisi toteuttaa ilman osastointia ja edelleen homeettomaksi siivousta. Homepöly leviää erittäin herkästi korjaustyömaan ulkopuolelle, ja usein remontoitavassa kohteessa on jo terveydeltään oireilevia rakennuksen käyttäjiä, joiden terveydentila voi huonontua kehnon osastoinnin vuoksi.

Käytännössä on osoitettu eri korjaushankkeessa, että hyväkin alipaineosastointi voi epäonnistua, kun jokin ennakoimaton ilmayhteys kosteusvaurion ja edelleen puhtaiden tilojen välillä säilyy. Nämä voivat olla esim. epätiiviydet kerrosten välisissä seinärakenteissa tai hissikuilun alipaineistuksen levittämät epäpuhtaudet. Merkkiainekokeet auttavat tilaajaa varmentamaan työmaa-aikaisen alipaineistuksen laadukkuuden, jottei rakennuksen käyttäjien terveydentilaa tai jo oireilevien henkilöiden terveydentilaa huononnetta kosteusvauriokorjausten aikana.

Käytännön mittausjärjestelyissä mittauksia voidaan suorittaa kaikkiin rakennuksen vaipan rakenteisiin, ala- ja yläpohjiin ja putkistoihin.

6.2 Ulkoseinän merkkiainekokeet

Ulkoseinän merkkiainekokeissa etsitään seinästä epätiiviyksiä ja mahdollisia halkeamia, joista voi tulla esim. mikrobiperäistä hajua huoneilmaan. Tutkittavassa tilassa saattaa olla terveydellistä oireilua tai mikrobiperäistä hajua, jonka alkuperää ei useinkaan saada paikannettua. Tila voi olla suuri ja siihen voi liittyä useampia tiloja hyvinkin monimuotoisine rakenteineen, jolloin epäpuhtauksien kulkeumareitin selvittäminen varmuudella saattaa olla vaikeaa.

Suomalaiset julkiset rakennukset ja niiden eri aikakausien rakenteet eroavat toisistaan huomattavasti, ja kokeiden toteutus pitää aina suunnitella kulloinkin tutkittavaa paikkaa silmälläpitäen. Kovin tarkkoja lähtötietoja ei ole välttämättä käytettävissä, mutta

mittaajan toimesta suurimman riskin rakenteiden selvittäminen ennakkoon ennen merkkiainekokeita on suositeltavaa.

Esimerkiksi betonisandwich-elementtiseinää tutkittaessa voidaan merkkiainekaasu johtaa ulkopuolelta eristetilaan poraamalla reikä ulkokuoresta eristetilaan ja asentamalla kaasuletku paikalleen. Poraus ulkoapäin ei välttämättä onnistu aina ilman suurempia järjestelyitä (useampikerroksiset rakennukset), jolloin voidaan porata reikä sisäpuolelta eristetilaan ja tiivistää kaasuletkun läpivienti huolellisesti. Mikäli liitos vuotaa vähääkään, kokeiden tulos vääristyy huomattavasti ja on epäluotettava. Lisäksi usein mitattaessa merkkiainekaasun pitoisuudet ovat erittäin pieniä (0,05-20 ppm), joten varmin lopputulos saavutetaan poraamalla reikä seinään ulkokautta.

6.3 Alapohjan merkkiainekokeet

Maanvastaisten alapohjien täyttökerroksissa on tyypillistä voimakas mikrobikasvu ja vähäinen homesienikasvusto (12). Rakennuksessa voimakkaan alipaineisuuden vallitessa saattaa korvausilmaa kulkeutua alapohjan liitosten ja epätiiviyksien läpi aiheuttaen mikrobiperäisten hajujen ja epäpuhtauksien siirtymisen sisäilmaan. Mikäli epäpuhtaudet aiheuttavat terveysperäistä oireilua, ne on katsottava terveyshaitaksi. Vanhoissa julkisivuelementeissä ja tiilirakenteisten ulkoseinien mineraalivillaeristeissä, rakennuksen ulkopinnalla ja ulkoseinien tuuletusraoissa kasvaa myös aina mikrobeja.

Näistä ei välttämättä ole haittaa käyttäjille, mutta muuttuneet olosuhteet, esim. lisääntynyt ilmastoinnin alipaineisuus, vesivuodot tai uusien ikkunoiden huolimattoman asennuksen aiheuttama ikkuna-seinä-liitosten tiiviyden huonontuminen saattaa aiheuttaa epäpuhtauksien siirtymisen sisäilmaan. Vanhoissa rakennuksissa saattaa alipaineistava ilmanvaihto edesauttaa epäpuhtauksien siirtymistä sisätiloihin (12). Korjauksia suunniteltaessa olisi hyvä ottaa huomioon, että alipaine ”kiskoo korvausilmaa jokaisesta mikroskooppisen pienestä raosta, joka rakenteessa löytyy” (12). Tämä aiheuttaa vaatimuksia ilmatiiviyden suunnitteluun korjauksia silmälläpitäen.

7 Käytännön kenttäkokeet laitteistoilla

7.1 Kokeiden 1, 2 ja 3 suorituspaikka

Kokeiden 1, 2 ja 3 suorituspaikka oli 1900-luvun alkupuolella teollisuusrakennukseksi rakennettu kiinteistö, joka oli remontin myötä muutettu työpaikka- ja toimistotiloiksi. Rakennus oli teräsbetoninen, paikallavalettu pilari-palkki-runkoinen rakennus. Erityinen huomio tässä kohteessa olivat monimuotoiset seinärakenteet, joita oli remonttien yhteydessä tehty yleensä muuraamalla. Rakennuksessa oli myös rakennusta pystysuunnassa lävistäviä pystykuiluja. Rakennuksessa oli toteutettu useita eri korjaustöitä vuosien aikana.

7.1.1 Merkkiainekoe 1: 13.2.2013, TILA 1

Kokeen suoritus:

Merkkikaasukokeessa 1 haluttiin selvittää toimistorakennuksen 5. ja 6. kerroksen välipohjan tiiviyttä kaasumaisia aineita vastaan. Laitteistot koottiin ja toimintavalmius testattiin.

7.1.2 Painesuhteet

Koe tehtiin niin, että tutkittava tila tehtiin alipaineiseksi sekä ulkoilmaa että tilaa, johon kaasu päästettiin, vasten. Tutkittavassa huoneessa tuloilmakanavat tukittiin muovikalvolla kalvon reunat ilmatiiviisti teipaten. Tutkittavan huoneen ilmanvaihdon poistoventtiilit olivat auki ja ilmanvaihto laitettiin tehostetulle asennolle, jolloin rakennuksessa aiemmin tehtyjen havaintojen perusteella saatiin tutkittavaan huoneeseen suurempi alipaineisuus. Välipohjaan porattiin 12 mm reikä. 5. ja 6. kerroksen välisiä ilman painesuhteita tarkasteltiin kannettavalla, hetkellistä ilmanpainetta mittaavalla paine-eromittarilla. Todettiin tutkittavan tilan alipaineisuus -1,0 - -2,0 Pa 5. kerroksen huonetilaa vasten.

Sekä vety- että rikkiheksafluoridikaasupullojen letkut asennettiin 6. kerroksen huoneesta poratun reiän läpi 5. kerroksen katon ilmatilaan. Liitoksen läpivienti tiivistettiin.

7.1.3 Mittaustapahtuma

Mittaus aloitettiin klo 9.15. Vetykaasua päästettiin 5. kerroksen ilmatilaan 5 ltr, ja rikkiheksafluoridia päästettiin samaan ilmatilaan 1 bar ylipaineella 20 sekuntia. Sensistor-vetykaasulaitteistolla saatiin mittaus välittömästi käyntiin laitteiston virran päällekytkemisen jälkeen. Innova-laitteistolla virran päällekytkemisen jälkeen kestää laitteiston kalibrointi ja itsetestaus puolen minuutin ajan, jonka jälkeen mittaus pääsee käyntiin. Kaasupulloista tulevien letkujen liitoksien tiiviys välipohjarakenteeseen tarkastettiin heti mittauksen aluksi. Vuotoa ei tässä mittaustapahtumassa havaittu.

Sensistor: Klo 9.54 Sensistor-mittalaite reagoi pikaisesti seinä-lattialiittymässä herkkyydellä 8. Innova-mittalaitteen anturi vietiin samaan kohteeseen, ja pitoisuudeksi saadaan 0,72-0,76 ppm. Muita havaintoja ei havaittu.

Klo 9.30 (15 min kaasupullon avaamisesta) rikkiheksafluoridin yleispitoisuus keskellä huonetta oli 1m korkeudella 1,1 ppm ja lattiatasolla 0,6 ppm.

Klo 10.00 koe lopetettiin, ja huoneen yleispitoisuutta tarkasteltiin rikkiheksafluoridilaitteistolla. Saatiin seuraavat lukemat huoneen keskikohdalta mitattaessa: lattian yläpinnassa 0,4-0,6 ppm, 2 m korkeudessa 1,1 ppm, 3 m korkeudessa 1,1 ppm.

7.1.4 Tulos, koe 1:

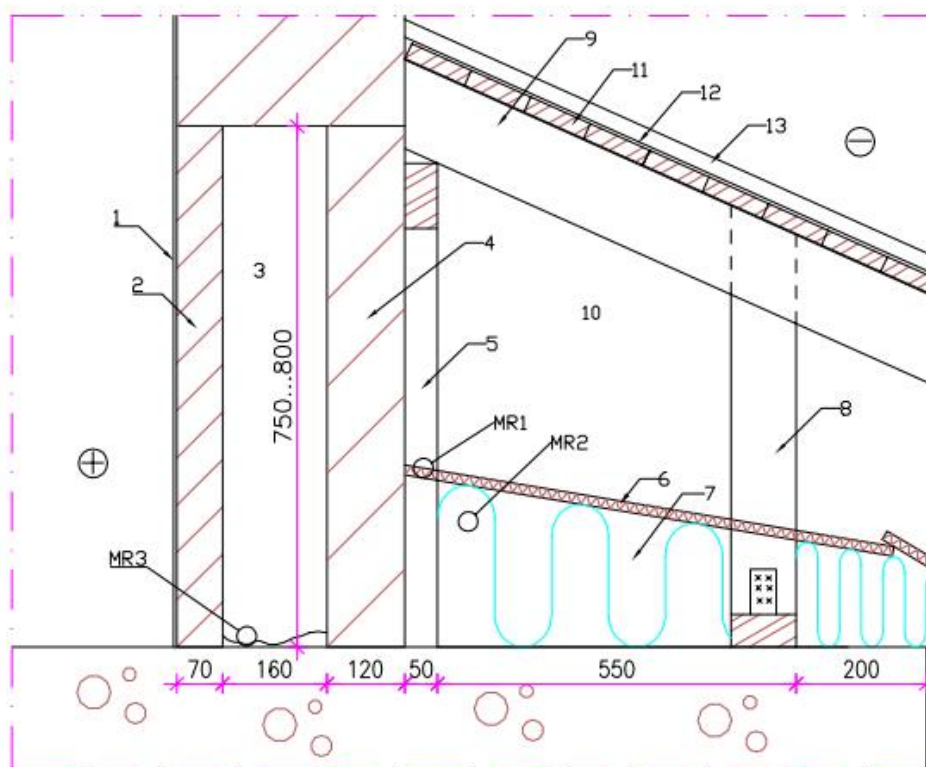
Tutkittava tila oli alipaineinen verraten tilaan, johon kaasu päästettiin. Havaitut kaasupitoisuudet olivat hyvin vähäisiä, ja seinä-lattialiittymässä todettiin pieni vuoto. Vähäinenkin tilaan virrannut rikkiheksafluoridi levisi tasaisesti tutkittavaan huonetilaan ja oli havaittavissa vielä 45 min kuluttua kaasun päästämisestä tasaisina pitoisuuksina.

7.2 Merkkiainekokeet 2 ja 3: 13.2.2013, TILA 2

Kokeen suoritus

Merkkikaasukokeissa 2 ja 3 vaihdettiin tutkittavaa huonetilaa pysyen samassa työpaikkarakennuksessa. Kokeessa 2 haluttiin selvittää työpaikkarakennuksen ulkoseinärakenteen tuuletustilan (kuva 14, numero 10) tiiviyyttä huonetilaa vasten.

Kokeessa 3 haluttiin selvittää saman huonetilan seinärakenteen vapaan ilmatilan (kuva 14, numero 3) tiiviyyttä huonetilaa vasten.



	1	TASOITE+MAALI
70mm	2	SYRJÄKIVIMUURAUS
160mm	3	VAPAA ILMATILA, YHTEYS VIEREISEEN HUONEESEEN
120mm	4	MUURAUS
	5	PUUTAVARA 50x100 K1200, MEK KIIN MUURAUKSEEN
15mm	6	TUULENSUOJALEVY
	7	ERISTE
	8	VÄLITUKI, PUUTAVARA 50x100 K1200
	9	YLÄJUOKSU, PUUTAVARA 50x125 K1200
	10	TUULETUSTILA
	11	RUODELAUDOITUS 25x100 K 100
	12	ALUSKATE
	13	KONESAUMATTU PELTIKATE

Kuva 14. Tila 2:n ulkoseinärakenne.

7.2.1 Painesuhteet, kokeet 2 ja 3:

Tutkittava tila tehtiin alipaineiseksi sekä ulkoilmaa että tilaa, johon kaasu päästettiin, vasten. Tutkittavassa huoneessa tuloilmakanavat tukittiin muovikalvolla kalvon reunat ilmatiiviisti teipaten. Tutkittavan huoneen ilmanvaihdon poistoventtiilit olivat auki, ja ilmanvaihto laitettiin tehostetulle asennolle. Tuuletustilan ja huonetilan välisiä ilmanpainesuhteita tarkasteltiin kannettavalla, hetkellistä ilmanpainetta mittaavalla paine-eromittarilla sekä kiinteästi asennetulla paine-eromittarilla.

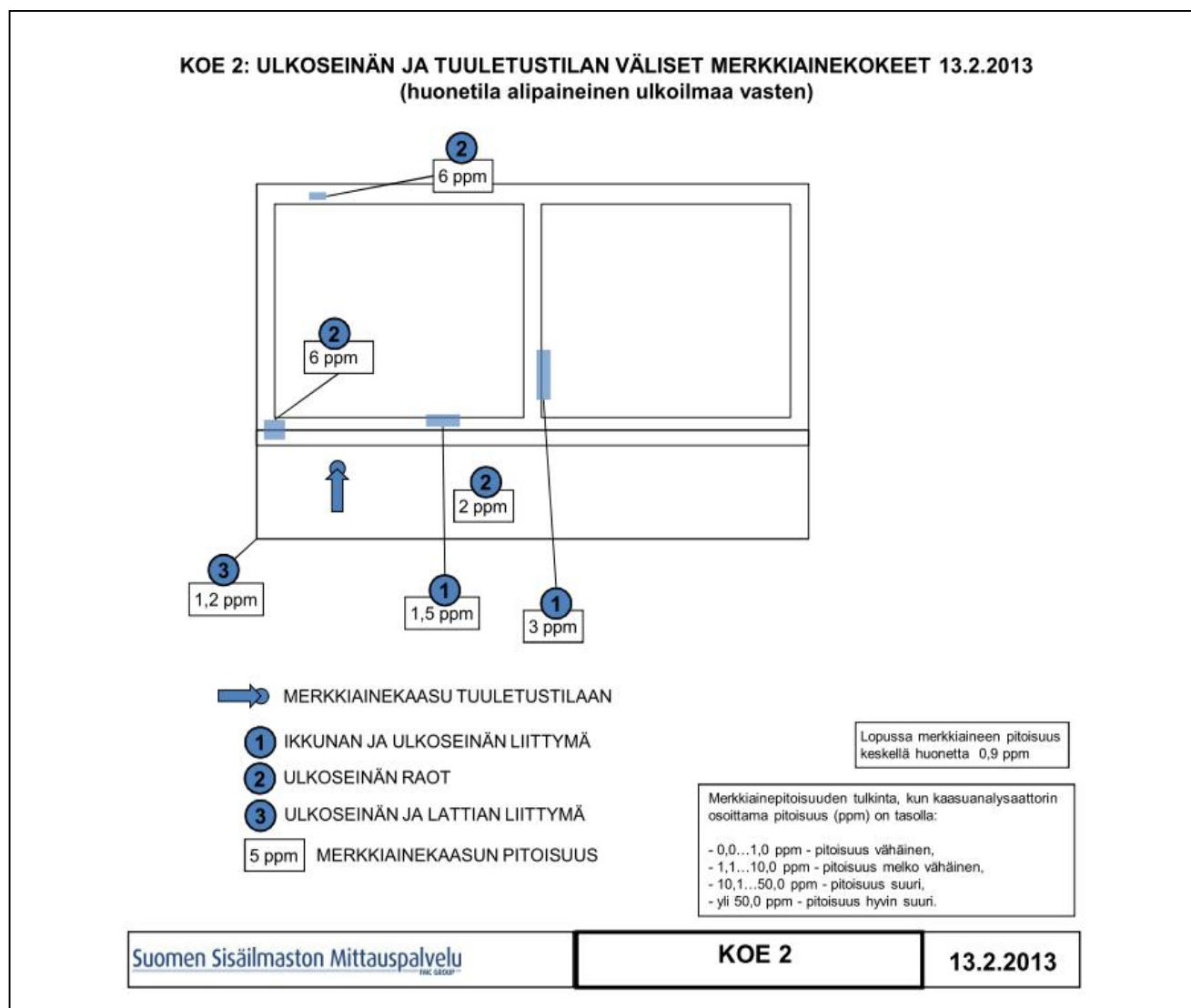
Todettiin huonetilan alipaineisuus -2,5 - -3,0 Pa tuuletustilaa vasten. Mitattava huonetila oli -6,0 - -7,0 Pa alipaineinen ulkoilmaa vasten. Paine-eromittaukset ulkoilman ja huonetilan väliltä kokeiden 2 ja 3 ajalta ovat liitteessä 1. Rikkiheksafluoridikaasupullojen letkut asennettiin tutkittavasta huonetilasta rakenteeseen poratun reiän läpi tuuletustilaan. Liitoksen läpivienti tiivistettiin.

7.2.2 Mittaustapahtuma

Rikkiheksafluoridia päästettiin vapaaseen, tuulettuvaan ilmatilaan 1 bar ylipaineella 40 sekuntia kokeessa 2. Kokeessa 3 seinärakenteen tiiviyyttä tutkittaessa vapaaseen ilmatilaan päästettiin rikkiheksafluoridia 1 bar ylipaineella 30 sekuntia.

Kaasupulloilta tulevien letkujen liitoksien tiiviys tuuletustilaan tarkastettiin heti mittaustapahtuman aluksi. Rikkiheksafluoridilaitteistolla ei havaittu vuotoa.

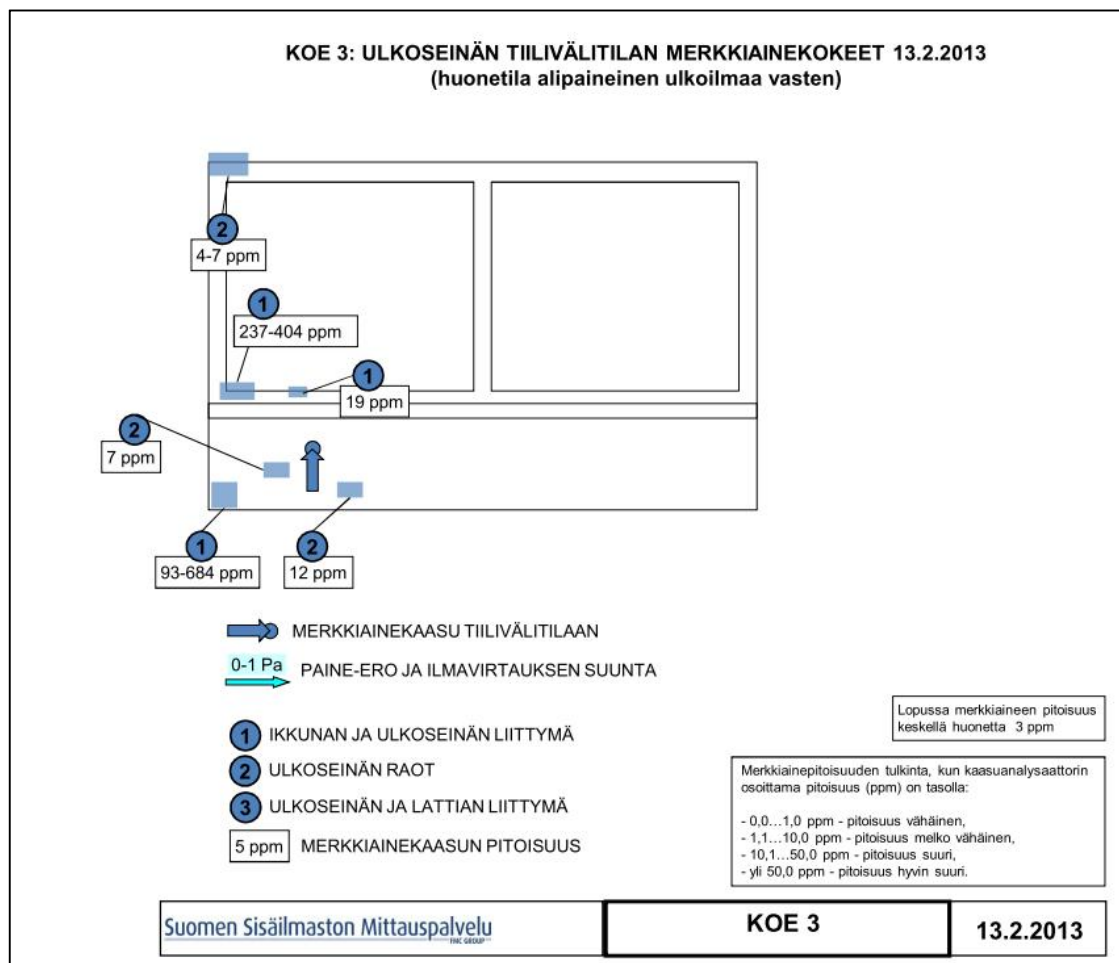
Rikkiheksafluoridilla havaittiin ilmavuotoja ikkunakarmin liitoksissa sekä seinärakenteen raoissa ja koloissa. Havaitut kaasupitoisuudet ovat esitetty kuvassa 15 kokeen 2 osalta ja kuvassa 16 kokeen 3 osalta.



Kuva 15. Havaitut ilmavuotokohtat ulkoseinärakenteessa kokeessa 2.

7.2.3 Tulos, koe 2

Tutkittava tila oli alipaineinen verraten tilaan, johon kaasu päästettiin. Havaitut kaasupitoisuudet olivat pienehköjä, mutta selviä ilmavuotokohtia havaittiin seinän halkeamista ja ikkunakarmin epätiiviyyksistä. Kokeen lopussa kaasun yleispitoisuus tutkittavassa huonetilassa oli 0,9 ppm.



Kuva 16. Havaitut ilmavuotokohdat ulkoseinärakenteessa kokeessa 3.

7.2.4 Tulos, koe 3:

Tutkittava tila oli alipaineinen verraten tilaan, johon kaasu päästettiin. Havaitut kaasupitoisuudet olivat suuria ja selviä ilmavuotokohtia havaittiin useita seinän epätiiviyksistä sekä ikkunakarmin liitoksista. Kokeen lopussa kaasun yleispitoisuus tutkittavassa huonetilassa oli 3 ppm.

7.3 Kokeet 4 ja 5: 11.7.2013, TILAT 3 ja 4

Kokeissa 4 ja 5 oli tarkoitus vertailla Sensistorin ja Innovan mittalaitteiden eroavaisuuksia 1990-luvun alkupuolella työpaikkarakennukseksi rakennetussa betonisandwich-elementtirakenteisessa kiinteistössä. Ikkunan ulkopuolella sijaitsevien

vesipeltien kaltevuus oli osoittautunut riittämättömäksi, ja vesipeltien liitoksista ja kittauksista oli vuosien varrella sadevesi vuotanut elementin lämmöneristetilaan. Tästä kosteudesta oli aiheutunut mikrobikasvustoa ja käyttäjien keskuudessa oli havaittu sisäilmaongelmaan viittaavaa. Seuraavana selvitystyössä olivat vuorossa rakenneavaukset ongelmallisiksi koettujen työtilojen ulkoseinärakenteeseen, ja näissä rakenneavauksissa oli havaittu vesipellityksen puutteet sekä elementin eristetilaan päässyt kosteus. Ulkopuolinen vesipellitys oli uusittu, ja sandwich-elementin sisäpinnan liitokset ja elementin saumat oli tiivistetty Ardex 8+9-järjestelmällä, mukaan lukien alustaan sivelty primerointi. Ardex-järjestelmällä estetään konvektiovirtaukset ja saavutetaan tutkimusten perusteella radon-tiivis rakenne (37). Rakennuksen ilmanvaihdon puhtauteen ja huoltoihin oli kiinnitetty erityistä huomioita, ja ilmanvaihtokanavat olivat erinomaisessa kunnossa.

7.3.1 Koe 4

Kokeen suoritus

Merkkikaasukokeessa haluttiin selvittää toimistorakennuksen korjausratkaisuiden toimivuutta kaasumaisia aineita vastaan. Laitteistot koottiin ja toimintavalmius testattiin. Tutkittava tila sijaitsi toisessa kerroksessa, joten ulkoseinään porattiin reikä sisäkautta betonikuoren läpi eristetilaan saakka. Seinän alaosa mitattiin kahdessa osassa, vasen ja oikea puoli erikseen, reiät huolellisesti tiivistäen. Tutkittavan puolen reikään asennettiin kaasuletku ja liitos tiivistettiin huolellisesti.

7.3.2 Painesuhteet

Tämä koe tehtiin niin, että tutkittava tila haluttiin saada alipaineiseksi sekä ulkoilmaa vasten että tilaa, johon kaasu päästettiin. Tutkittavassa huoneessa tuloilmakanavat tukittiin teipillä ilmatiiviisti. Tutkittavan huoneen ilmanvaihdon poistoventtiilit avattiin. Ulkoilman ja huoneilman välisiä painesuhteita tarkasteltiin kannettavalla, hetkellistä ilmanpainetta mittaavalla paine-eromittarilla. Todettiin tutkittavan tilan poikkeava ylipaineisuus 4-6 Pa ulkoilmaa vasten ja tilan alipaineisuus 1-2 Pa käytävän ilmaa vasten.

7.3.3 Mittaustapahtuma

Ikkunoiden lukitus oli varmistettu. Kaasupullolta ulkoseinärakenteeseen johtavan letkun liitoksen tiiviys tarkastettiin heti mittausten aluksi. Vuotoa ei näissä mittaustapahtumissa havaittu. Mittaus aloitettiin, ja typpi-vetykaasua päästettiin ulkoseinärakenteen eristetilaan 1 bar ylipaineella 15 sekunnin ajan. Seinän oikea ja vasen puoli tutkittiin erikseen.

7.3.4 Sensistor

Sensistor-mittalaitteella ryhdyttiin käymään läpi seinän oikeaa ja vasenta puolta tutkittaessa Sensistorin anturilla, laitteen ollessa herkimmillään, asetuksella 10. Laitteen mittausanturia liikuteltiin systemaattisesti vuotoa etsien kunnes laite reagoi, ja herkkyys vaihdettiin asetukselle 5. Asetuksella 5 havaittiin kahdesta patterikannattimesta tulevan ilmapuotoa. Tämän jälkeen tarkastelua jatkettiin, eikä muita vuotoja havaittu. Tehdyt kaasuhavainnot ovat kuvassa 17.

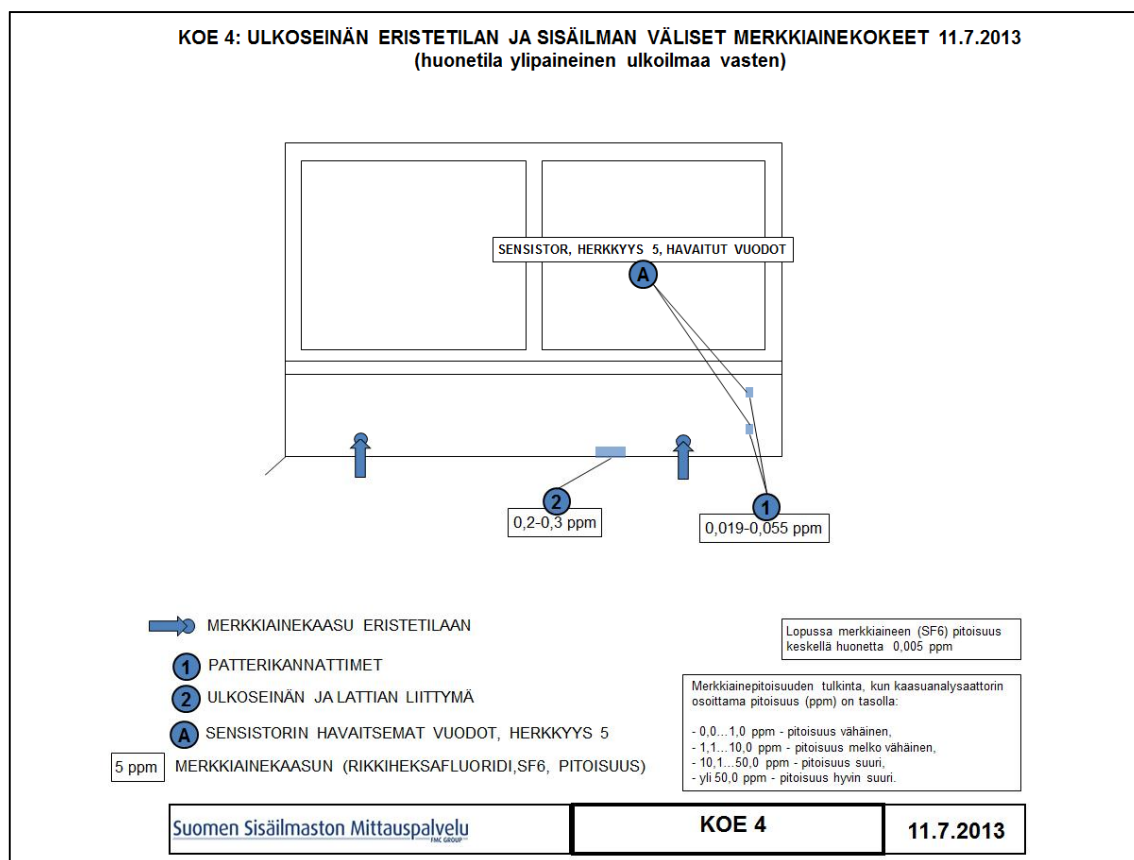
7.3.5 Innova

Mittalaite laitettiin päälle ja rikkiheksafluoridikaasua päästettiin ulkoseinärakenteen eristetilaan 1 bar ylipaineella 15 sekunnin ajan molemmissa tapauksissa. Tutkittiin erikseen erillisinä mittauksina seinän oikea ja vasen puoli.

Kaasupullolta ulkoseinärakenteeseen johtavan letkun liitoksen tiiviys tarkastettiin heti molempien mittausten aluksi. Vuotoja ei havaittu.

Mittapäällä ryhdyttiin käymään läpi ulkoseinärakennetta keskittyen ensisijaisesti kokemusperäisesti todennäköisimpiin vuotokohtiin sekä mittajaan omiin kohteissa tekemiin havaintoihin. Laitteen mittausanturia liikuteltiin systemaattisesti vuotoa etsien, ja käytiin läpi tutkittavan ulkoseinän alue. Patterikannattimista havaittiin tulevan pientä vuotoa, 0,019-0,055 ppm sekä lattialistan alareunasta havaittiin tulevan pientä vuotoa, 0,161-0,296 ppm.

Huoneen yleispitoisuus mitattiin lopuksi sekä oikean että vasemman puolen mittaamisen jälkeen, ja sen todettiin olevan 0,005 ppm (5 ppb). Tulos on niin pieni, että se mahtuu laitteen virhemarginaaliin. Tehdyt kaasuhavainnot ovat kuvassa 17.



Kuva 17. Kokeessa 4 tehdyt kaasuhavainnot.

7.3.6 Tulos, koe 4

Tutkittava tila oli poikkeuksellisesti ylipaineinen verraten tilaan, johon kaasu päästettiin. Havaitut kaasupitoisuudet olivat pieniä ja molemmilla laitteilla havaittiin vuodot samoista kohdista. Ilmavuotokohtia havaittiin patterikannattimista ja seinä-lattialiittymästä.

7.3.7 Koe 5: 11.7.2013, TILA 4

Merkkikaasukokeessa haluttiin selvittää toimistorakennuksen korjausratkaisuiden toimivuutta kaasumaisia aineita vastaan. Näissäkin mittauksissa tutkittiin erikseen ulkoseinän vasen ja oikea puoli molemmilla kaasulaitteistoilla. Laitteistot koottiin ja testattiin toimintavalmius. Tämäkin tutkittava tila sijaitsi toisessa kerroksessa, joten porattiin reiät ulkoseinän eristetilaan sisäpuolen betonikuoren läpi. Toinen rei'istä

tukittiin aina tiiviisti seinän toisen puolen mittauksen ajaksi. Tutkittavan puolen reikään asennettiin kaasuletku, ja liitos tiivistettiin huolellisesti.

7.3.8 Paine-erot

Tutkittava tila haluttiin saada alipaineeksi sekä ulkoilmaa vasten että tilaa, johon kaasu päästettiin. Tutkittavan huoneen tuloilmakanavat tukittiin teipillä ilmatiiviisti. Toinen tutkittavan huoneen ilmanvaihdon poistoventtiileistä avattiin. Ulkoilman ja huoneilman välisiä painesuhteita tarkasteltiin kannettavalla, hetkellistä ilmanpainetta mittaavalla paine-eromittarilla. Tila oli 2-4 Pa alipaineinen ulkoilmaa vasten ja 6-8 Pa käytävän ilmatilaa vasten.

7.3.9 Mittaustapahtuma

Ikkunoiden lukitus varmistettiin ja mittaus aloitettiin. Typpi-vetykaasua päästettiin ulkoseinärakenteen eristetilaan 1 bar ylipaineella 15 sekunnin ajan seinän kumpaakin puolta tutkittaessa.

7.3.10 Sensistor

Sensistor-laitteistolla saatiin mittaus välittömästi käyntiin. Kaasupullolta ulkoseinärakenteeseen johtavan letkun liitoksen tiiviys tarkastettiin heti mittauksen aluksi. Havaittiin vuoto, jolloin mittaus keskeytettiin ja liitos tiivistettiin uudelleen. Kun työ oli saatu valmiiksi, ryhdyttiin mittaamaan uudelleen.

Ulkoseinärakennetta ryhdyttiin käymään läpi Sensistorin ollessa herkimmillään, asetuksella 10. Laitteen mittausanturia liikuteltiin systemaattisesti vuotoa etsien, kunnes laite reagoi ja herkkyys vaihdettiin asetukselle 5. Asetuksella 5 havaittiin yhdestä patterikannattimesta tulevan ilmavuotoa. Ilmavuotoa havaittiin tulevan myös ikkunan alareunasta, ikkunakarmin ja seinän liitoksesta. Ikkunan saranoiden alareunoista havaittiin myös ilmavuotoa. Tehdyt kaasuhavainnot ovat kuvassa 18.

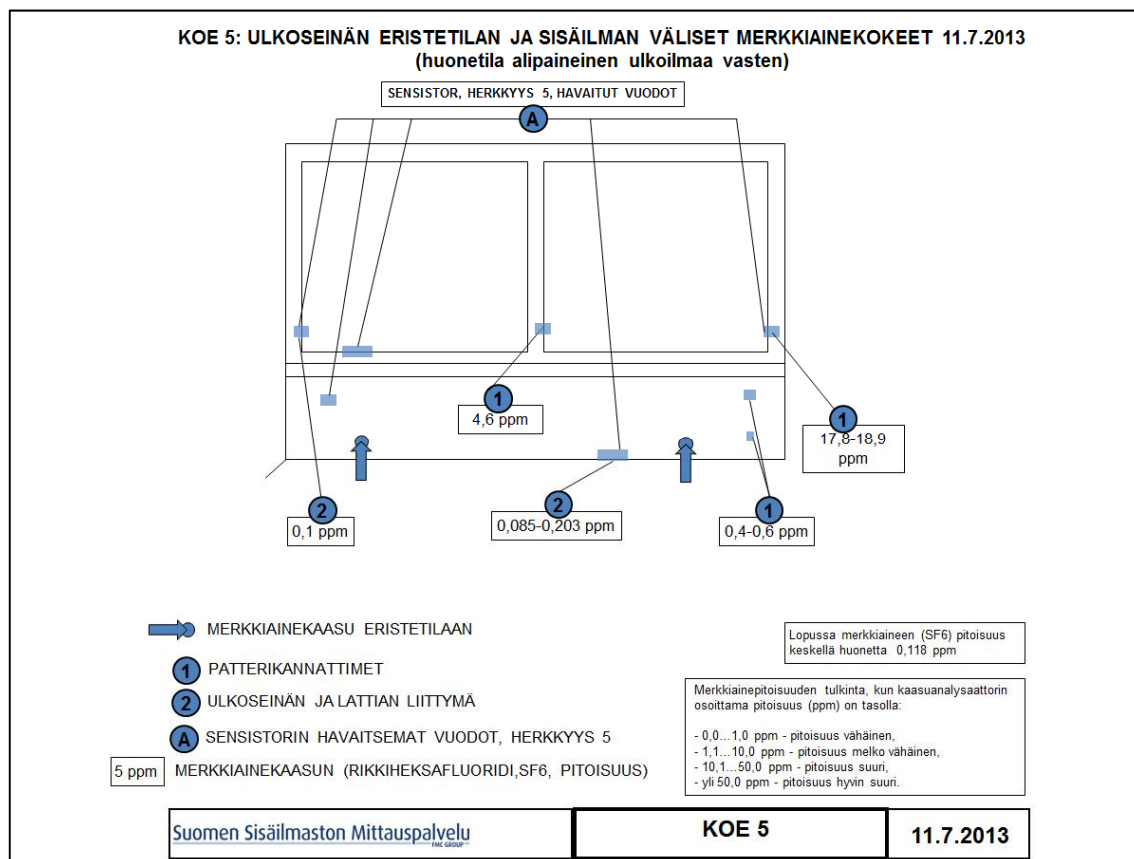
7.3.11 Innova

Mittaustapahtuma

Ulkoilman ja huoneilman välisiä painesuhteita tarkasteltiin kannettavalla, hetkellistä ilmanpainetta mittaavalla paine-eromittarilla. Tila oli 3-5 Pa alipaineinen ulkoilmaa vasten ja 6-7 Pa käytävän ilmatilaa vasten.

Mittalaite laitettiin päälle ja rikkiheksafluoridikaasua päästettiin ulkoseinärakenteen eristetilaan 1 bar ylipaineella 15 sekunnin ajan kummassakin kokeessa. Kaasupullosta ulkoseinärakenteeseen johtavan letkun liitoksen tiiviys tarkastettiin heti mittausten aluksi. Vuotoa ei havaittu.

Mittapäällä ryhdyttiin läpikäymään ulkoseinärakennetta, kokemusperäisesti todennäköisimpiin vuotokohtiin sekä mittaajan omiin kohteessa tekemiin havaintoihin ensisijaisesti keskittyen. Laitteen mittaasanturia liikuteltiin systemaattisesti vuotoa etsien, ja käytiin läpi tutkittavan ulkoseinän aluetta. Patterikannattimista havaittiin tulevan pientä vuotoa, 0,202-0,416 ppm sekä lattialistan yläreunasta havaittiin tulevan pientä vuotoa, 0,085-0,203 ppm. Suuremmat vuotopaikat havaittiin ikkunakarmin ja seinän liitoksesta, 4,6-18,9 ppm. Ikkunan saranoiden liittymäkohdasta seinään havaittiin tulevan pientä vuotoa, 2,0-6,5 ppm. Huoneen yleispitoisuus mitattiin 17 min kuluttua toisen mittauksen aloittamisesta, ja sen todettiin olevan 0,118 ppm. Tehdyt kaasuhavainnot ovat kuvassa 18.



Kuva 18. Kokeessa 5 tehdyt kaasuhavainnot.

7.3.12 Tulos, koe 5

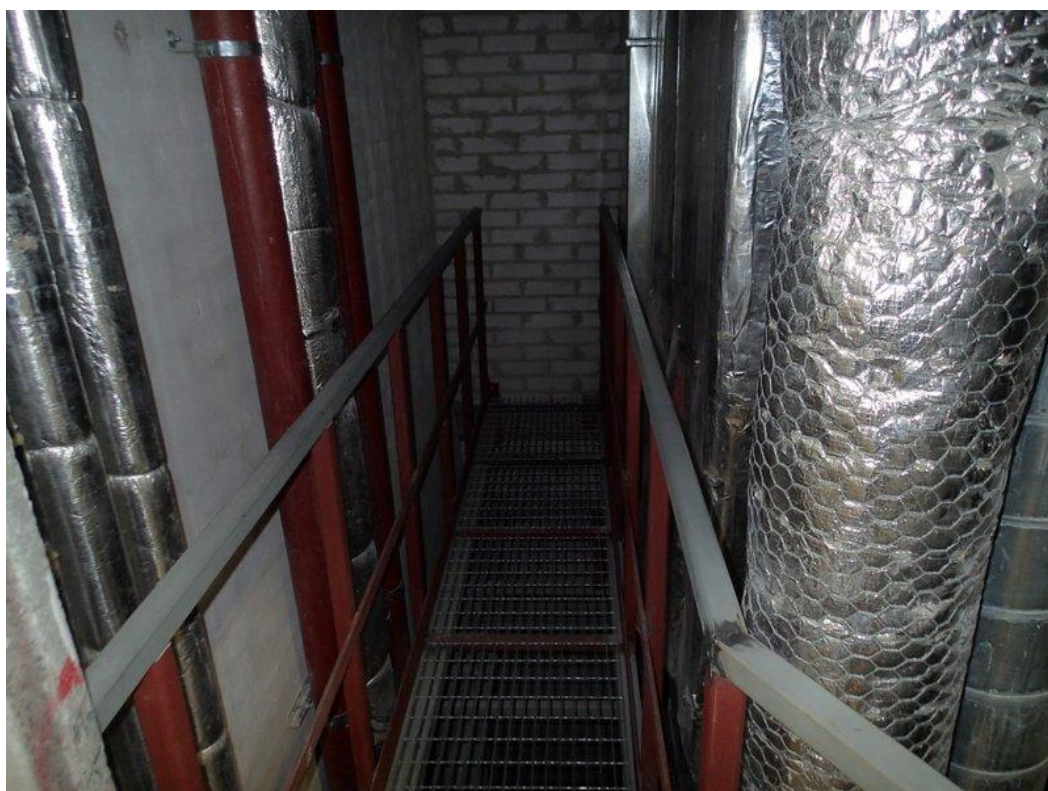
Tutkittava tila oli alipaineinen verraten tilaan, johon kaasu päästettiin. Havaitut kaasupitoisuudet olivat pienehköjä ja selviä ilmapuotokohtia havaittiin useita seinän epätiiviyksistä sekä ikkunakarmin liitoksista. Molemmilla laitteistoilla havainnot olivat yhteneviä. Kokeen lopussa rikkiheksafluoridin yleispitoisuus tutkittavassa huonetilassa oli 0,118 ppm.

7.4 Kokeet 6,7,8,9 ja 10: 3.11.2013, TILA 5

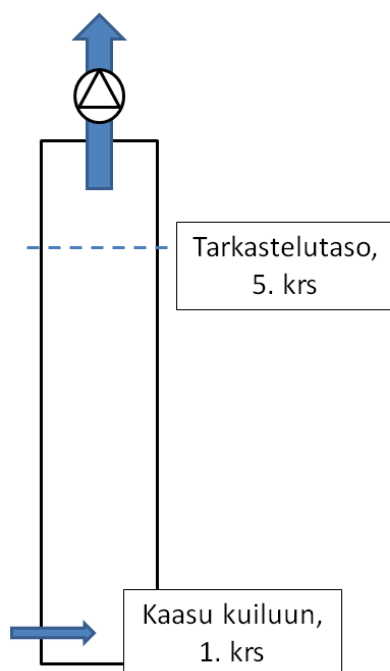
Merkkikaasukokeissa haluttiin selvittää kaasun kulkeutumisnopeutta toimistorakennuksen alipaineistetussa kuilurakenteessa. Kokeessa pyrittiin saamaan esille eri kaasujen ominaisuuksia lähes identtisissä olosuhteissa. Koetta ei toteutettu päästämällä samanaikaisesti sekä rikkiheksafluoridi- ja vetykaasua kuilun ilmatilaan

Sensistorissa havaitun virhenäyttämän vuoksi, koska Sensistor reagoi virheellisesti rikkiheksafluoridin esiintymiseen tarkkailtavassa ilmanäytteessä.

Laitteistot koottiin ja toimintavalmius testattiin. Tila oli rakennuksen pystysuunnassa lävistävä betoni- ja tiilirakenteinen kuilurakenne. Kuilussa oli vaakasuuntaisia metalliritilärakenteita jokaisen kerrostason korkeudella sekä kuilun seinämällä pystysuuntaisia LVI-putkia ja kanavia (kuva 19). Periaatekuva mittausjärjestelystä on kuvassa 20.



Kuva 19. Tutkittava kuilurakenne. Kuilun sisämitat olivat 2,1 x 3,6 metriä. Kerrostasojen lattian tasalla olivat metalliset ritilät huoltotasoina.



Kuva 20. Kokeiden 6,7,8,9,10 mittausjärjestely.

Kaasu päästettiin ilmaan 1. kerroksessa ja tarkkailu tapahtui 5. kerroksessa, 18 metrin pystyetaisyysdellä kaasun syöttöpisteestä. Kuilun sisämitat olivat 2,1 x 3,6 metriä. Kerroksessa 1 paine-eromittarin letku ja kaasuletku asennettiin oven metallikarmiin reikien läpi ja ovi suljettiin. Viidennessä kerroksessa kuilurakenteen seinään porattiin reikä paine-erologgerille ja liitos tiivistettiin. Mittaaja asettui kuilun sisäpuolelle ja kuilun ovi suljettiin.

Vety-typipikaasua päästettiin 1. kerroksen tasalle kuilun ilmatilaan, kuilun keskikohtaan noin 1,5 metrin korkeudelle lattiasta. Kokeessa 6 kaasun määrä oli 3 bar paineella (2 bar ylipaineella ilmakehän paineeseen verraten) 90 sekunnin ajan, kokeissa 7 ja 8 3 bar paineella 180 sekunnin ajan. Kaasuletkun kuilun sisällä oleva pää oli vaakatasossa osoittamassa kuilun takaseinää. Kokeissa 6,7,8,9 ja 10 kaasun syöttöön käytettiin samaa kaasuletkua, ja kaasun syöttöpiste pysyi samana kaikissa kokeissa. Kaasupullot oli kokeissa 6,7,8,9 ja 10 sijoitettu kuilun ulkopuolelle 1. kerrokseen ja kuilun ovet olivat kokeiden suorituksen ajan suljettuina.

7.4.1 Paine-erot

Tutkittava tila oli koneellisesti alipaineistettu huoneilmaa vasten. Kuilurakenteen ovet ja luukut pidettiin kiinni kokeen suorituksen ajan. Huoneilman ja kuilun ilman välisiä painesuhteita tarkasteltiin jatkuvatoimisilla paine-eromittareilla koko mittauksen ajan. Paine-erokuvaaja on liitteessä 2, tulokset ovat minuutin välein eivätkä ne ole keskiarvostettuja. Kokeita 6,7,8 suoritettaessa tila oli 20-26 Pascalia ja kokeita 9 ja 10 suoritettaessa 25-30 Pascalia alipaineinen huoneilmaa vasten.

7.4.2 Sensistor

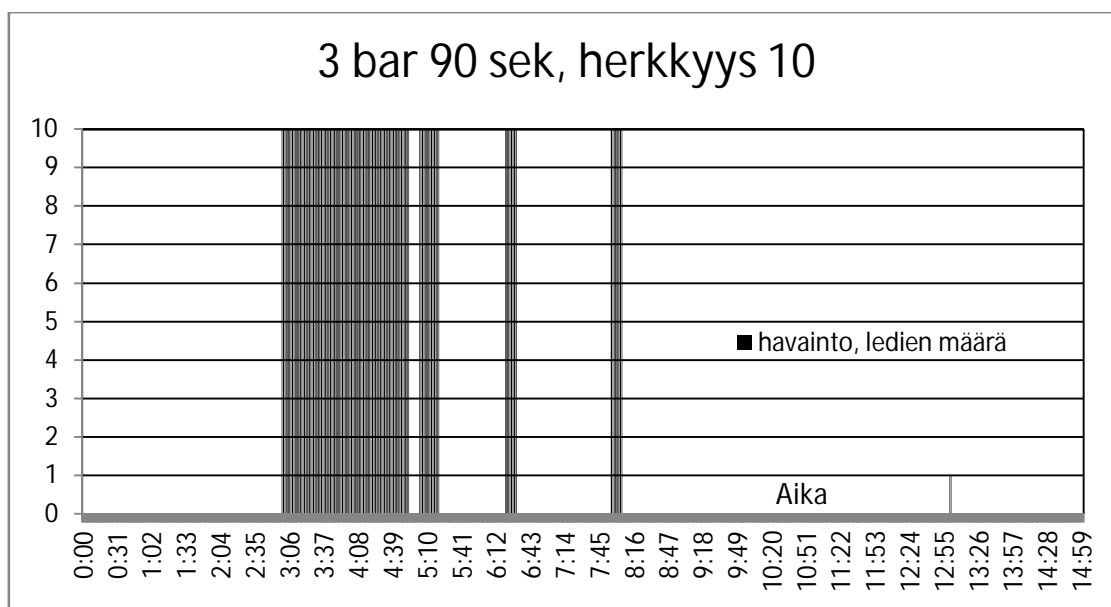
Kokeet 6 ja 7 toteutettiin Sensistorin ollessa herkimmillään, asetuksella 10. Kokeessa 8 herkkyys oli asetuksella 5, jota laitteistovalmistaja suosittelee mittausten suorittamiseen. Anturia pidettiin alaspäin suunnattuna kuilun keskikohdalla viidennen kerroksen tasalla ja kuilussa liikuttiin hyvin hitaasti. Sensistorin anturia pidettiin eteenpäin ojennetun käden päässä, jotta mittajaan uloshengitysilma ei aiheuttaisi virhenäyttämiä. Kokeiden 6-8 suoritusajaksi valittiin 15 ja 20 min, koska vetykaasun esiintymisen havaittiin lakkaavan melko nopeasti kuilurakenteessa.

Kuvissa 22-24 ovat havainnot vetykaasun esiintymisestä Sensistorin näyttämänä. Liitteinä 3-5 on pöytäkirja tehdyistä havainnoista. Sensistorin näyttämien ledien määrä on kuvattu y-akselille. Ensimmäinen havainto vetykaasusta tehtiin kokeen 6 osalta 179 sekunnin ja kokeen 7 osalta 176 sekunnin kuluttua kaasun päästämisestä kuiluun. Erityisen merkillepantavaa on, että kokeissa 6 ja 7 laite saattoi olla välillä minuutin tai yli minuutin ajan vailla lainkaan näyttämiä, ja sitten yhtäkkiä havaitsi vetyä täysillä 10 ledin lukemilla. Tämä toistui useasti.

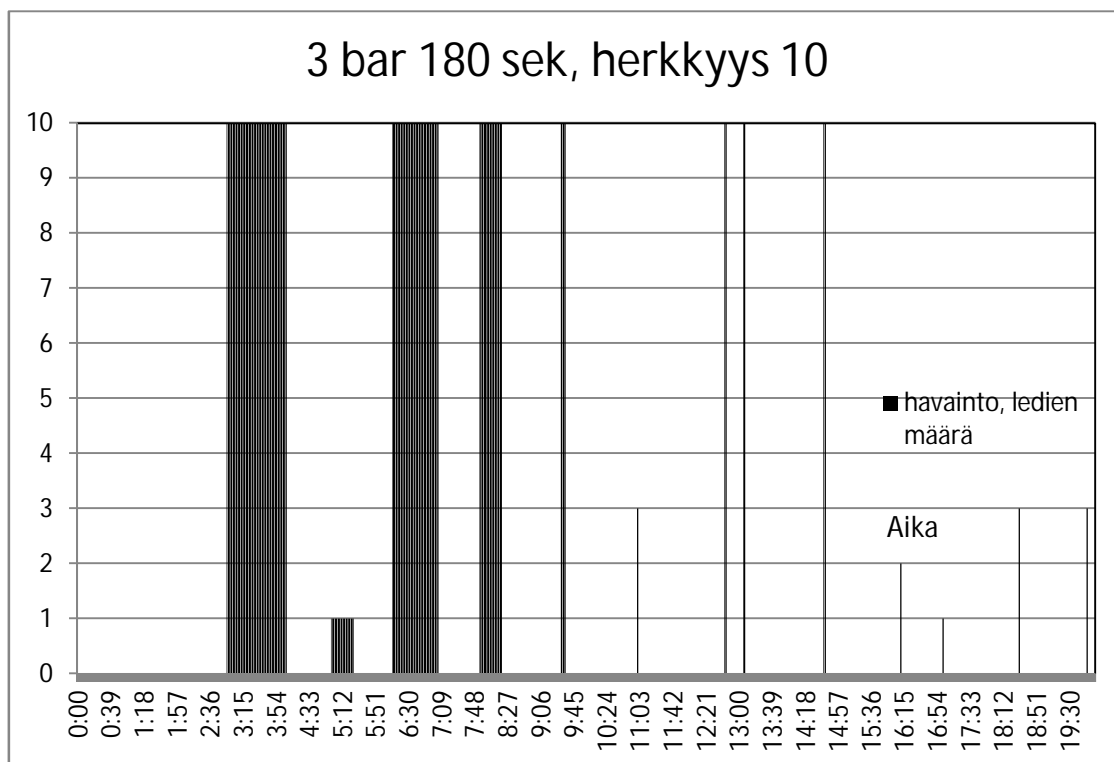
Kuilurakenteen mitat olivat 2,1 x 3,6 metriä. Kuitenkaan yhdessäkään kokeista 6,7 ja 8 Sensistor ei havainnut vetykaasua kuilun takaosassa (kuva 21), vaan kaikki havainnot tulivat noin metrin päästä kuilun etuosasta. Sensistorilla tutkittiin koko kuilun alalta LVI-putkien välejä ja ilmastointikanavien välejä, mutta niistä ei tehty havaintoja kuilun keski- ja takaosassa, vaan ainoastaan kuilun etuosassa ja seinällä kulkevien vesiputkien takana havaittiin useasti vetykaasua.



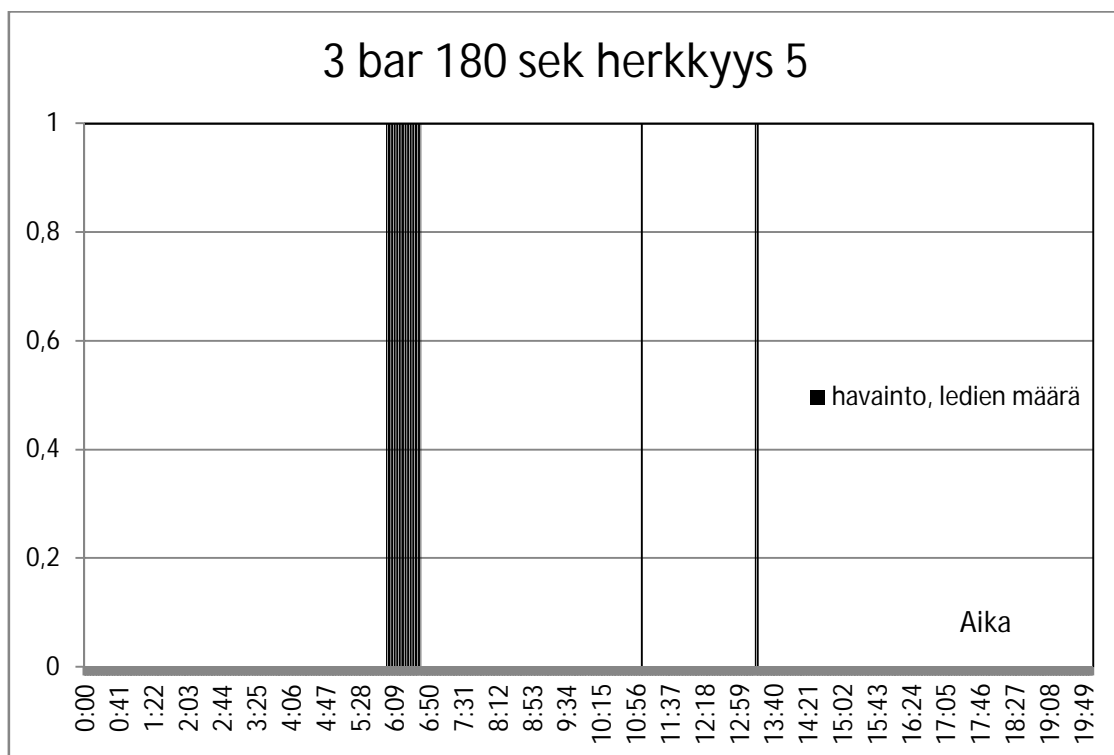
Kuva 21. Kuilun takaosassa vaakamitoiltaan 40 x 60 cm oleva pystysuuntainen tila, josta Sensistor ei kertaakaan havainnut vetykaasua.



Kuva 22. Kokeessa 6 Sensistor-laitteistolla tehdyt vetykaasuhavainnot.



Kuva 23. Kokeessa 7 Sensistor-laitteistolla tehdyt vetykaasuhavainnot.

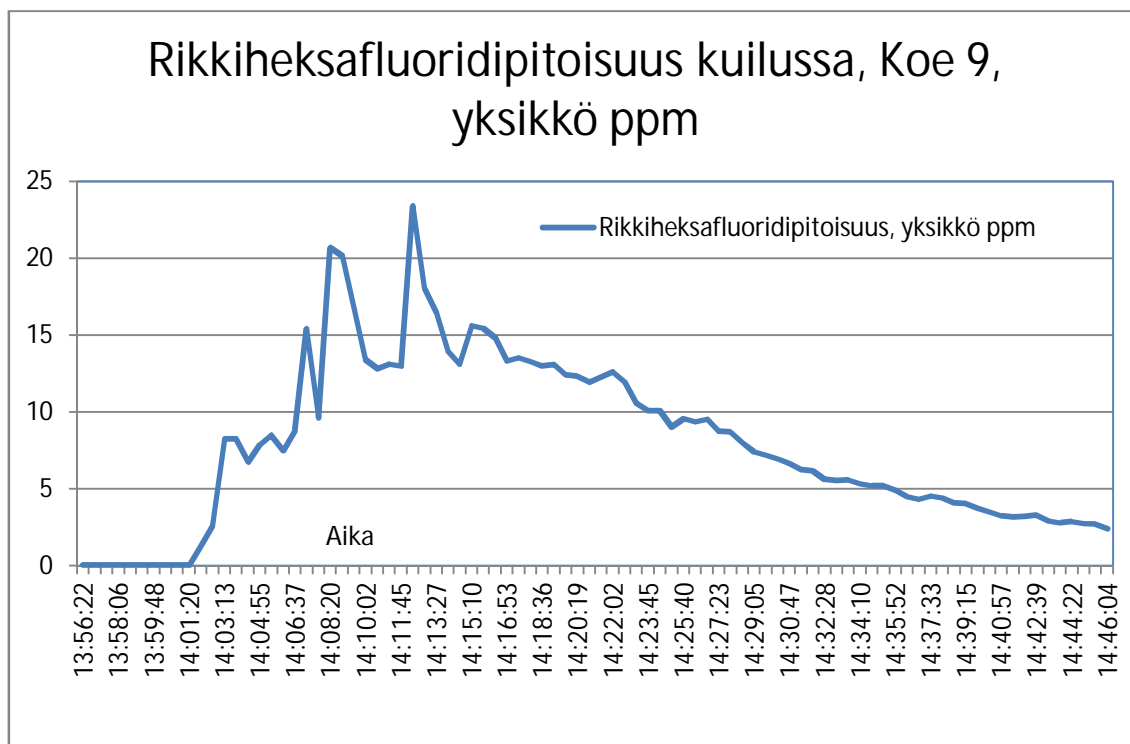


Kuva 24. Kokeessa 8 Sensistor-laitteistolla tehdyt vetykaasuhavainnot.

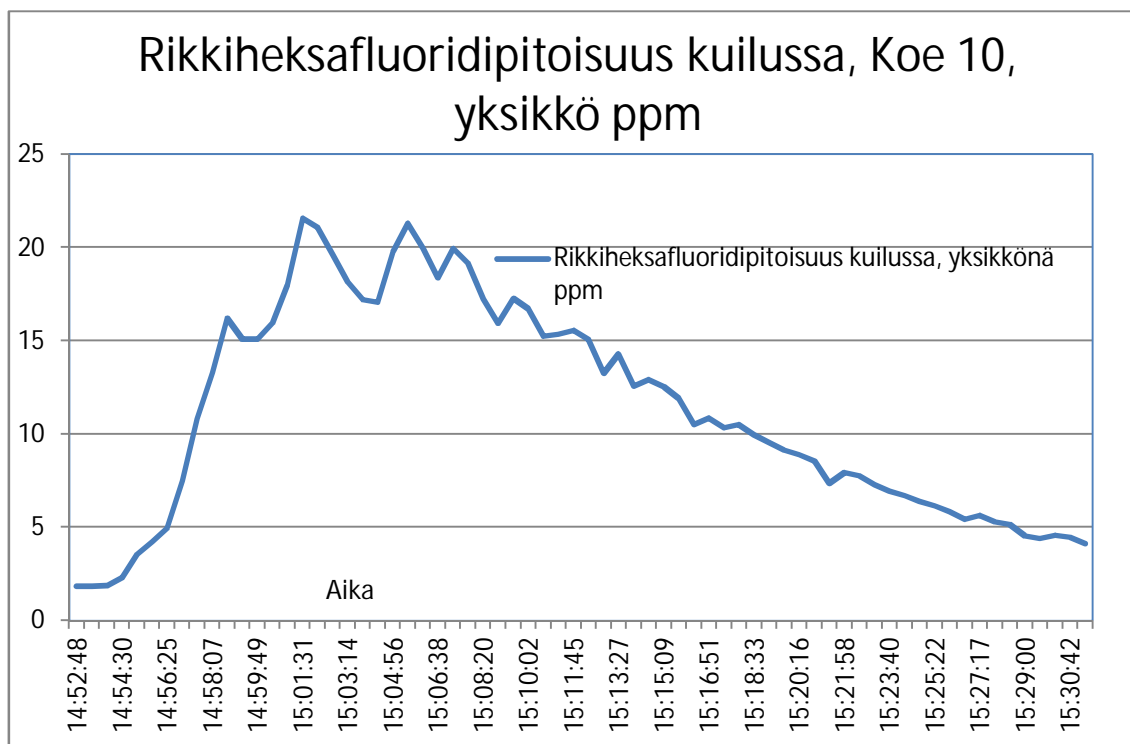
7.4.3 Innova

Rikkiheksafluoridikaasua päästettiin kokeissa 9 ja 10 kuilurakenteen ilmatilaan 1 bar ylipaineella 30 sekunnin ajan. Tarkkailuaika oli kokeessa 9 45 minuuttia ja kokeessa 10 35 minuuttia. Kaasun syöttöpiste 1. kerroksessa oli sama kuin kokeissa 6, 7 ja 8. Kokeissa 9 ja 10 kaasuanalysaattorin letkun pää ja täten myös mittauspiste oli kuilun takaosassa, IV-kanavan takana sijaitsevassa 40 x 60 cm ilmatilassa 20 cm päästä seinästä. Kokeessa 10 mittauspiste oli kuilun etuosassa nurkassa, aivan kuilun seinään kiinni asetettuna.

Kaasupitoisuuden kuvaajat ovat kuvissa 25 ja 26, ja niistä havaitaan kaasupitoisuuden kehittyminen molemmissa kokeissa samankaltaisesti. Huippupitoisuudet olivat molemmissa kokeissa 21-23 ppm, ja molemmissa kokeissa kaasupitoisuus aleni tasaisesti ajan kuluessa. Vaikka 1. kerroksessa kaasun syöttöpiste oli täsmälleen sama kuin vetykaasulla kokeissa 6,7 ja 8, rikkiheksafluoridilla kaasupitoisuus oli samanlainen kuilun eri osissa.



Kuva 25. Kokeen 9 rikkiheksafluoridikaasun pitoisuus ajan funktiona kuilurakenteessa 5. kerroksen tasalla.



Kuva 26. Kokeen 10 rikkiheksafluoridikaasun pitoisuus ajan funktiona kuilurakenteessa 5. kerroksen tasalla.

7.4.4 Tulos, kokeet 6,7,8,9 ja 10

Tutkittava tila oli alipaineistettu ja suljettu tila. Ilmavirtaukset pystykuilussa eivät olleet hallittuja. Vetykaasu kevyenä kaasuna saattoi nousta hyvinkin nopeasti pystysuuntaisten ilmavirtausten mukana eikä levinnyt näiden kokeiden mukaan tasaisesti tilaan. Vetykaasuhavaintoja tehtiin epäsäännöllisesti. Rikkiheksafluoridin pitoisuudet kehittyivät tasaisesti molemmissa kokeissa ja kokeiden lopussa yleispitoisuudet tutkittavassa tilassa olivat 2,4 ja 4,1 ppm.

8 Tulosten arviointi

8.1 Virheen arviointi

Molempien laitteistojen käyttöön sisältyy virhetulkintojen mahdollisuus. Varsinkin jos merkkikaasu johdetaan tutkittavaan rakenteeseen tutkittavasta tilasta, on kaasuliitosten tiiviys tarkistaminen tärkeää. Mikäli kaasuletku on porattu

kerroksellisten levyrakenteiden läpi, täytyy kaasun joskus arvaamatonkin kulkeutuminen pystyä nopeasti havainnoimaan mittauksissa. Hallitsemattomat kaasuvuodot kaasupullojen paineenalentimesta tai kaasupullosta rakenneosaan johtavan letkun liitoksissa voivat aiheuttaa suuria virhetulkintoja. Tällöin itse rakenneosasta vuotavaa kaasua ei havainnoida, vaan pitoisuudet sekoittuvat hallitsemattoman kaasuvuodon taustapitoisuuteen. Virhe voidaan minimoida tarkkailemalla kaasupullon ja kohteessa tehtyjen liitoksien tiiviyttä.

Painesuhteiden merkitys kokeiden suorittamiselle on suuri. Tutkittavan tilan tulee olla alipaineinen verraten tilaan, johon kaasu päästetään. Tuulen vaikutus koko rakennuksen painesuhteisiin on kuitenkin suuri, ja tuulen aiheuttama paine-ero saattaa olla reilusti yli 35 Pascalia normaalitilanteeseen verraten.

Myös esimerkiksi betonisandwich-elementin ilmavuotoja mitattaessa voivat vallitsevat tuuliolosuhteet vaikuttaa siihen, mihin suuntaan elementin eristetilassa kaasu lähtee etenemään. Tämä korostuu tuulisilla paikoilla sijaitsevissa korkeissa rakennuksissa. Toisaalta tämä kertoo myös betonisandwich-elementin villaosassa tapahtuvista ilman liikkeistä. Myös sandwich-elementin eristeen asennus ja tuuletusrakojen toiminta vaikuttavat mittauksiin, ja nämäkin tekijät on otettava huomioon mittauksia tehtäessä.

Kaasun liikkuvuus tutkittavassa rakenneosassa on myös tärkeää havainnoida. Esimerkiksi alapohjarakenteita tutkittaessa voi kaasun siirtyminen tutkittavaan tilaan kestää yli 30 min, mikäli kaasu joutuu etenemään esimerkiksi maakerroksessa. Myös yläpohjarakenteita tutkittaessa kaasun siirtyminen villalevyeristeen tai paksun kevytsoraeristekerroksen läpi voi kestää yli 30 min, joten pikaisia johtopäätöksiä ei mitattaessa voida tehdä.

Kokeissa 4 ja 5 Sensistoria ja Innovaa vertailtaessa molemmat laitteistot osoittivat ilmavuotopaikat melko yhtenäisesti, vaikka havaitut kaasupitoisuudet olivat erittäin pieniä ja tiivistystyö oli tehty ammattitaitoisesti ja suurella tarkkuudella. Huoneen mittausaikainen alipaineistaminen nostaa havaittuja kaasupitoisuuksia sekä parantaa kokeiden toistettavuutta.

Itse kaasujen eroavaisuudet kävivät parhaiten esille kokeissa 6-10, joissa tutkittiin kuilurakenteessa kaasupitoisuuden kehittymistä. Sensistorilla kaasupitoisuuden

tarkempi määrittely on haastavaa ja mitattaessa kaasun kulkeutuminen mittapäälle oli erittäin vaihtelevaa. Vaikka vety-typrikaasua päästettiin ilmatilaan melko runsas määrä, niin välillä Sensistor oli kokonaan reagoimatta kaasupitoisuuteen, ja välillä taas se reagoi ilmaisten täyden 10 ledin verran kaasupitoisuutta. Esimerkiksi kannettavan puhaltimen käyttö olisi saattanut levittää vetykaasun tasaisemmin kuilun alueelle.

Kaikissa tehdyissä kokeissa molemmat kaasut liikkuvat hyvin, ja viimeistään kolmen minuutin kuluttua oli havaittavissa merkkiaineikaasua. Kuitenkin kokeissa 6, 7 ja 8 vedyn kulkeutuminen oli huomattavan epäsäännöllistä rikkiheksafluoridiin kokeisiin 9 ja 10 verraten, koska mitattavan kuilun takaosassa ei tehty lainkaan kaasuhavaintoja. Rikkiheksafluoridilla kaasupitoisuus kehittyi tasaisesti samaa kuilurakennetta mitattaessa ja aleni tasaisesti, kun taas vedyn pitoisuutta ei saatu määrättyä tällä mittaussasetelmalla. Eräs jatkoselvityskohde voi juuri olla vedyn käyttäytyminen isoja kuilurakenteita tai muuten tilavuudeltaan suuria rakenteita mitattaessa puhaltimen

8.2 Vertailua

Sensistor-laitteisto on nopea- ja helppokäyttöinen kokonaisuus. Laite painaa vain 2,5 kg mittausvalmiina ja on erittäin helposti käsiteltävä Innovan kaasuanalysaattoriin verraten.

Laitteistojen hintaero on suuri, ja Sensistor-laitteiston suuri etu on vähäinen huollon tarve. Sensistor-laitteisto on erinomaisesti suojattu ja mittauksia voidaan tehdä myös pakkasella sekä sateessa. Laitteelta ei saa numeerista arvoa ja laitteen herkkyys on satakertaisesti huonompi kuin Innovan, mutta toisaalta laite kykenee havaitsemaan alle yhden miljoonasosan pitoisuudet vetykaasua kuutiossa ilmaa.

Molemmat laitteistot vaativat selvän, tunnetun paine-eron tutkittavan rakenteen eri puolille, mutta vetylaitteistolla tämä piirre voi erityisesti korostua.

Rikkiheksafluoridilaitteisto soveltuu konvektiotiiviyden tarkasteluun sekä erittäin tarkkoihin hajuhaittamittauksiin. Se ilmoittaa havaitun kaasupitoisuuden numeroarvona, josta voidaan tehdä joitain johtopäätöksiä tutkimuskysymysten selvittämisessä. Arvoa ei kuitenkaan voida käyttää suurempia johtopäätöksiä tehtäessä, sillä kaasun

alkukonsentraatiota, ts. kuinka paljon kaasua on tilassa, josta kaasun kulkeutumista tutkimustilaan halutaan selvittää, ei tiedetä.

Täten rikkiheksafluoridin ppm-arvoa ei voida käyttää kuin viitteellisesti, ja selkein johtopäätös rikkiheksafluoridilaitteistollakin on vain havainto, pääseekö kaasua tutkittavaan tilaan vai ei. Tulosten tulkinnassa kokemusperäiset havainnot korostuvat. Innovan rikkiheksafluoridilaitteisto vaatii käyttäjältään enemmän kokemusta ja käyttötaitoa, ja käytännön kokeissa mahdolliset virhelähteet ovat erittäin suuret. Myös kaasun yleispitoisuutta tutkittavassa tilassa tulee aktiivisesti tarkkailla.

9 Rakentamisen laadunvalvonta

Työn tilaaja, rakennuttaja, haluaa varmistaa omistamaansa kiinteistöön tehtyjen töiden laadukkuuden ja urakoitsijan työn toteutuksen suunnitelmien mukaisesti. Esimerkiksi ulkoseinärakenteiden kosteusvauriot ovat monipuolisia, sekä julkisen puolen rakentamisessa että omakotirakentamisessa.

Esimerkiksi puuttuvien salaojien aiheuttama liiallinen maaperän kosteus rakennuksen alapuolisessa ryömintätilassa voi aiheuttaa sisäilmaongelman. Ryömintätiloihin on rakennusaikana saattanut jäädä homehtuvaa materiaalia, useimmiten puuta. Alapohjan tuuletus voi olla epätäydellinen, sitä ei ole tai se on tukittu. Epäpuhtaudet voivat tällöin siirtyä ympäröivien rakenteiden (ulkoseinä-alapohja-liitos, putkiläpiviennit) epätiiviyksien ja saumojen välityksellä sisäilmaan.

Edelleen esimerkiksi rakennuksen sisätiloissa sijaitseva salaojien tarkastuskaivo luukkuineen voi olla puutteellisesti suljettu, ja kaivosta saattaa olla jatkuva ilmayhteys sisätiloihin. Salaojien tarkastuskaivossa voi olla lahoa puuainesta, joka kosteuden aiheuttaman lahoamisen myötä voi aiheuttaa terveyshaitan rakennuksen käyttäjille.

Myös esim. paikallavalurakentamisen yhteydessä rakenteisiin tai kantavan betoniseinän alle jäänyt puuaines saattaa aiheuttaa sisäilmaongelman, jonka maaperän kosteus käynnistää ja edelleen ylläpitää mikrobitoimintaa homehtumiselle alttiissa materiaalissa. Useimmiten ongelman tarkka paikallistaminen on vaikeaa ja vaatii myös rakenneavauksia, mutta kun ongelman käsittely on yhteistyössä hyväksytty, oikeaan rakenneosaan kohdistetut korjaukset tuottavat usein hyvän

lopputuloksen. Usein pitkittyneen sisäilmaongelman yhteydessä myös työsuojelulliset seikat ja työntekijän oikeus terveellisiin työtiloihin kärjistyvät, ja vaikka rakennetekniset ennakkotutkimukset sekä korjaussuunnittelu saattavat maksaa, usein halvin ratkaisu on kohdistaa korjaukset heti oikeaan rakenneosaan.

10 Johtopäätökset

Kosteusvaurioiden ja sisäilmaongelmien selvittäminen on vaativaa erityistyötä, ja kokemuseräisellä osaamisella on erittäin suuri merkitys.

Varsinkin sisäilmaongelmien selvityksen alkuvaiheessa asiantuntemuksella voidaan välttää tarpeettomia tai tarpeettoman laajoja tutkimuksia sekä rakenteiden virheellisiä avauksia. Julkisissa rakennuksissa, rivi- ja kerrostaloissa sekä omakotitaloissa on eri rakenneratkaisuita muunneltuneen vuosikymmenien aikana toteutettu lukematon määrä. Jokainen kohde on yksilöllinen, ja erilaisia rakenneratkaisuita, jopa erittäin kokeellistakin rakentamista on tehty Suomessa runsaasti. Korjausrakentamisessa tulevat kuitenkin eri aikakausien ratkaisut ja ongelmat käytännössä vastaan, ja laaja-alaiselle kokemukselle sekä tarkalle havainnoinnille on kysyntää. Merkkiainekokeilla saadaan usein varmuus korjausten kohdistamisesta oikeaan rakenneosaan sekä voidaan varmentaa korjaustyön laadukkuus. Alipaineistetussa tilassa toteutetuilla merkkiainekokeilla saadaan osoitettua ilmavuodot eri rakenteiden läpi. Molemmat tutkittavat laitteistot soveltuvat ilmavuotojen osoittamiseen, ja rikkiheksafluoridilaitteisto soveltuu varsinkin tilanteisiin, joissa tutkittavan tilan ilmavirtaukset eivät ole hallittuja. Tulosten tulkinnessa korostuvat kokemuseräiset havainnot ilmavuodon merkittävydestä.

Ilmavuotojen haitallisuuteen on ruvettu kiinnittämään runsaammin huomiota, ja hyvin toteutettu rakennushanke työmaa-aikaisella kosteudenhallinnalla ja laadunvalvonnalla pyrkii jo ennakkoon estämään mahdollisia sisäilmaongelmia.

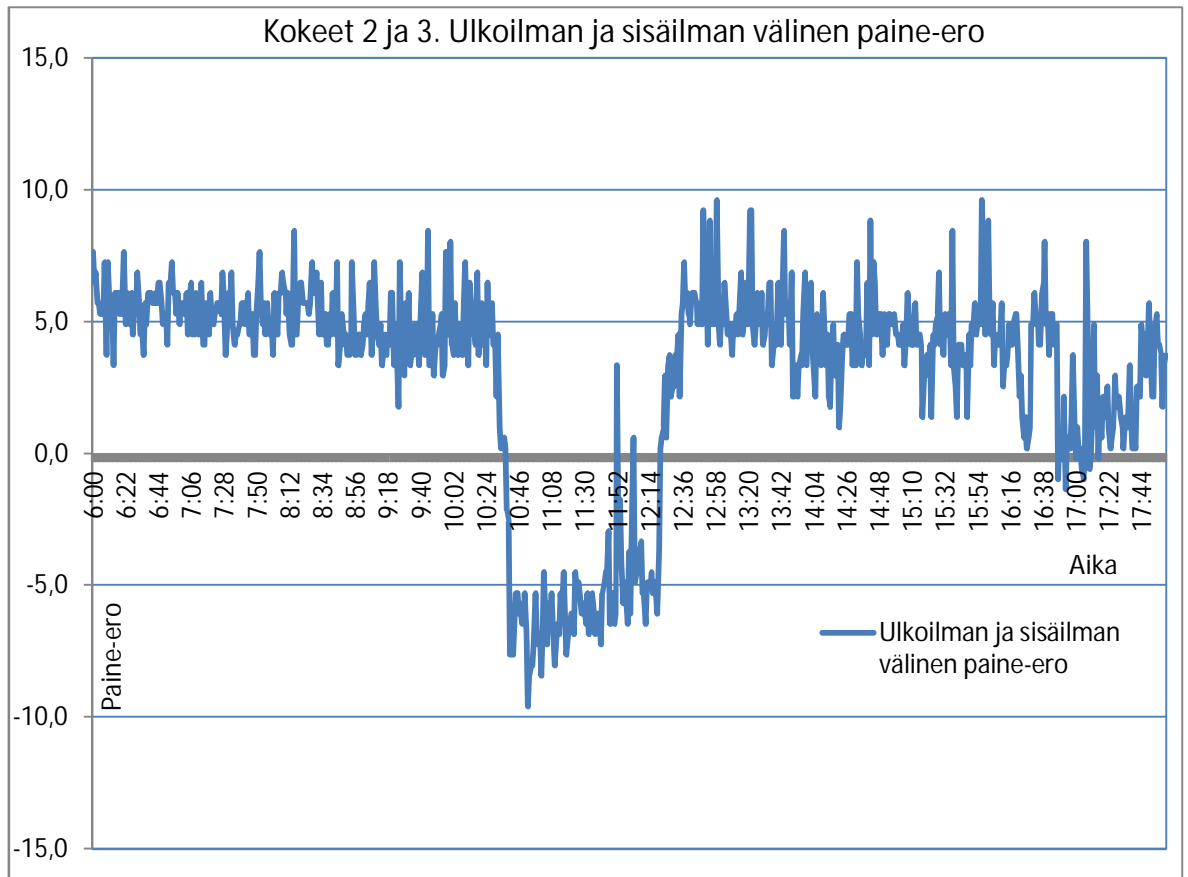
11 Lähteet

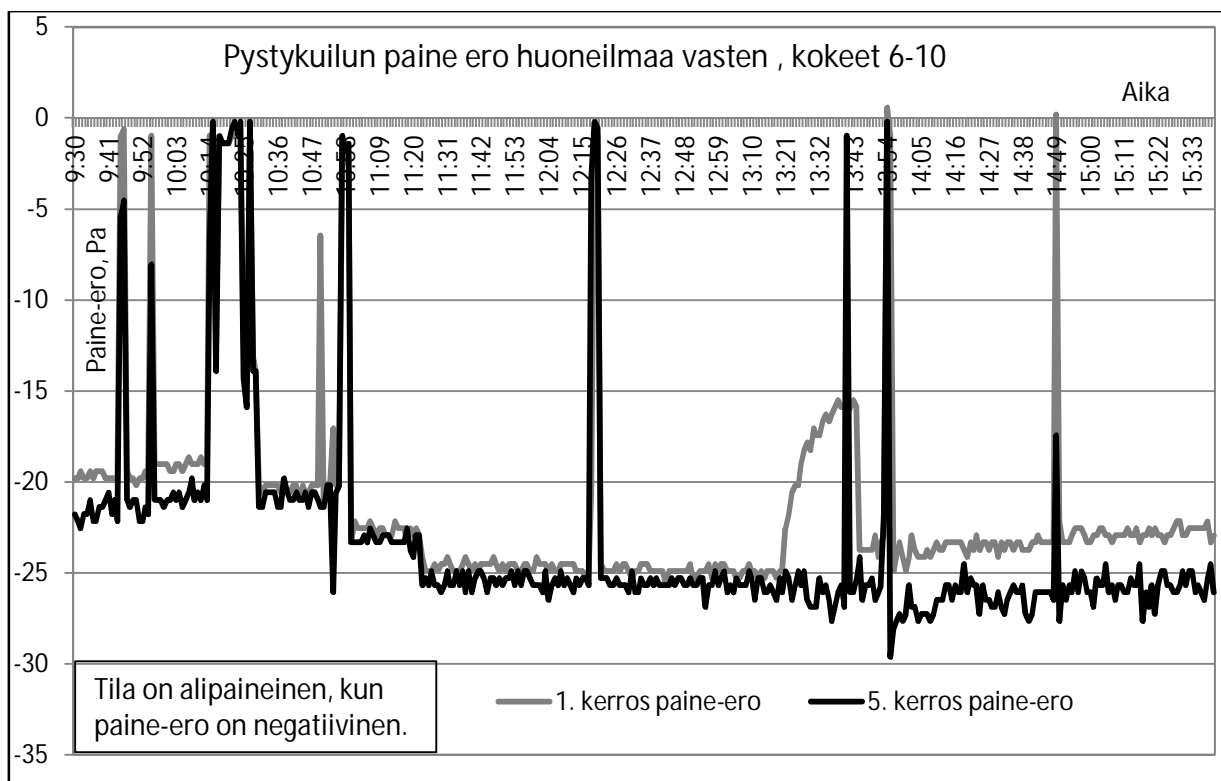
- 1 Siikanen, Unto. 1996. Rakennusfysiikka, perusteet ja sovellukset. Helsinki: Rakennustieto.
- 2 Björkholtz, Dick. 1997. Lämpö ja kosteus, Rakennusfysiikka. Helsinki: Rakennustieto.
- 3 RIL 250-2011. 2011. Kosteudenhallinta ja homevaurioiden estäminen. Helsinki: Suomen Rakennusinsinöörien liitto RIL ry.
- 4 Leivo, Virpi & Rantala, Jukka. 2002. Maanvastaiset alapohjarakenteet – kosteustekninen mitoittaminen ja korjaaminen, Tutkimusraportti 121. Tampereen teknillinen yliopisto. Rakennetekniikan laitos.
- 5 D3 Suomen Rakentamismääräyskokoelma. 2012. Verkkodokumentti. http://www.finlex.fi/data/normit/37188-D3-2012_Suomi.pdf. Luettu 10.1.2013.
- 6 Rt-kortti RTRakMK-21504. 2011. Helsinki: Rakennustieto Oy.
- 7 Kauppinen Timo et al. 2009. Verkkodokumentti. Rakennusten ilmanpitävyys, Sisäilmayhdistyksen seminaari. http://www.sisailmayhdistys.fi/attachments/sem2009/kauppinen_timo.pdf. Luettu 4.10.2012.
- 8 Vinha, Juha. 2012. Verkkodokumentti. Rakennusten ilmanpitävyys ja ilmatiiviiden rakenteiden toteutus, Rakentamisen Teemapäivä, Lahti. [http://www.lahti.fi/www/images.nsf/files/C835A9B30A33C18BC22579CA004A4A2F/\\$file/Lahti%20Ilmanpit%C3%A4vyys%20Juha%20Vinha_140312.pdf](http://www.lahti.fi/www/images.nsf/files/C835A9B30A33C18BC22579CA004A4A2F/$file/Lahti%20Ilmanpit%C3%A4vyys%20Juha%20Vinha_140312.pdf). Luettu 4.10.2012.
- 9 Pellinen, Lauri. 2011. Ilmavuodon vaikutus vaipparakenteiden lämpö- ja kosteusoloihin. Lappeenranta, Saimaan Ammattikorkeakoulu. https://publications.theseus.fi/bitstream/handle/10024/35412/Pellinen_Lauri.pdf?sequence=1. Luettu 4.10.2012.
- 10 Sisäilmayhdistys ry. 2008. Helsingin, Espoon ja Vantaan Terveelliset tilat, Sisäilmayhdistys ry:n Internet-sivut. <http://www.sisailmayhdistys.fi/terveelliset-tilat-tietojarjestelma/terveysvaikutukset/eri-tekijoiden-vaikutus-oireisiin/>. Luettu 4.10.2012.
11. Asumisterveysopas, 3. korjattu painos. 2009. Ympäristö- ja terveys-lehti.
12. Sisäilmaongelmaisten koulurakennusten korjaaminen. 2008. (toim.) Vesa Asikainen. Helsinki: Opetushallitus
13. Ilmatieteen laitos. 2010. Verkkodokumentti. Ilmakehän kerrokset <http://ilmatieteenlaitos.fi/ilmakeha-ja-saailmiot>. Luettu 10.1.2013.

14. Zumdahl, Steven S.. Chemistry, 4.th edition. 1997. Houghton Mifflin Company, Boston. Isbn 0-669-41794-7.
15. TTL. 2003. Rikkiheksafluoridin kansainvälinen kemikaalikortti
<http://kappa.ttl.fi/kemikaalikortit/khtml/nfin0571.htm>. Luettu 10.1.2013.
16. AGA Oy. 2013. Rikkiheksafluoridin käyttöturvallisuustiedote
[http://www.aga.fi/international/web/lg/fi/like35agafi.nsf/repositorybyalias/3erikois_rikki6fluo/\\$file/rikkiheksafluoridi.pdf](http://www.aga.fi/international/web/lg/fi/like35agafi.nsf/repositorybyalias/3erikois_rikki6fluo/$file/rikkiheksafluoridi.pdf). Luettu 30.10.2013.
17. TTL. 2006. Verkkodokumentti. Typpi (puristettu kaasu), kansainvälinen kemikaalikortti. <http://kappa.ttl.fi/kemikaalikortit/khtml/nfin1198.htm>. Luettu 30.10.2013.
18. Inficon Ab. 2013. Verkkodokumentti. Läcksökning med utspädd vätgas som spårgas. http://www.sensistor.com/hydrogen_method_hydrogen.asp?dot=3. Luettu 11.1.2013.
19. US Department of the Interior. 1986. Verkkodokumentti. Evaluating ventilation parameters of three coal mine cobs, Pittsburgh.
http://www.osti.gov/energycitations/product.biblio.jsp?osti_id=6917060. Luettu 11.1.2013.
20. Lester, D.; Greenberg, L.A. 1950. The Toxicity of Sulfur Hexafluoride.
[Arch. Indust. Hyg. & Occupational Med.](#) 1950, Sept Vol. 2 No. 3 pp. 348-9.
21. X Bévenot, A Trouillet, C Veillas, H Gagnaire, M Clément. 2000. Hydrogen leak detection using an optical fibre sensor for aerospace applications. Sensors and Actuators B: Chemical Volume 67, Issues 1-2. pp. 57–67.
[http://dx.doi.org/10.1016/S0925-4005\(00\)00407-X](http://dx.doi.org/10.1016/S0925-4005(00)00407-X). Luettu 18.11.2013.
22. Barton et al. 1984. Hydrogen leak monitor for a turbine-generator. United States patent 4440017, April 3, 1984.
23. Hayes, D.J.; Horn, G. 1971. Leak detection in sodium heated boilers. J. Brit. Nucl. Energy Soc. 10: 41-8.
http://www.osti.gov/energycitations/product.biblio.jsp?osti_id=4747861. Luettu 18.11.2013.
24. Sisäilmaopas. 2011. Allergia- ja Astmaliitto ja Hengityслиitto ry. Helsinki: Nykypaino.
25. Finnlamelli Oy. 2008-2013. Verkkodokumentti. Tutkitusti tiivis.
<http://www.finnlamelli.fi/tuotetietoa/tutkitustitiivis>. Luettu 23.10.2013.
26. Innova AirTech Instruments. 2005. Product Data sheet for 1412 Photoacoustic Field-Gas Monitor. Ballerup, Denmark.
27. LumaSense Technologies. 2013. Verkkodokumentti. Photoacoustic Gas Monitor INNOVA 1412i. <http://lumasenseinc.com/EN/products/gas-monitoring/gas->

- monitoring-instruments/photoacoustic-gas-monitor-innova-1412i.html. Luettu 16.1.2013.
28. Säteilyturvakeskus. 2013. Verkkodokumentti. Perustietoa radonista.
http://www.stuk.fi/sateilytietoa/sateilyn_terveysvaikutukset/fi_FI/radonin_terveyshaitta. Luettu 30.10.2013.
 29. Sähköturvallisuuden edistämiskeskus. 2009. Verkkodokumentti. IP-numeroiden merkitys.
http://www.stek.fi/sahkoturvallisuus/sahkolaitteiden_ip_luokitus/fi_FI/ip_numeroiden_merkitys/. Luettu 30.10.2013.
 30. Inficon Leak Detection Catalog, Edition 2013. Verkkodokumentti. Hydrogen Leak Detector Sensistor XRS9012
<http://products.inficon.com/GetAttachment.axd?attaName=a6693c67-20bb-4675-ac06-bfd17d82a677>
 31. Sosiaali- ja terveysministeriö. 2003. Asumisterveysohje. Oppaita 2003:1. Helsinki.
 32. New Jersey Department of Health and Senior Services. 2002. Verkkodokumentti.
<http://nj.gov/health/eoh/rtkweb/documents/fs/1760.pdf>. Luettu 30.10.2013.
 33. Niskala, Karoliina. 2010. Jätevesilietteen aumakompostoinnin kehittäminen ilmaan purkautuvien hajukaasujen vähentämiseksi. Prosessi- ja ympäristötekniikan osasto, Vesi- ja ympäristötekniikan laboratorio, Diplomityö.
<http://www oulu.fi/poves/pages/publ/dipl/karoliinaniskala.pdf>. Luettu 18.9.2013.
 34. Immonen, Markus. 2008. Paine-eron vaikutus ilmapuotokohdan ympäristön pintalämpötilaan. Opinnäytetyö. Helsinki. Stadia AMK.
<http://www.doria.fi/bitstream/handle/10024/38555/stadia-1206442103-6.pdf?sequence=1>
 35. Lukander, Martti. 2010. Verkkodokumentti. Painovoimaisen ilmanvaihdon tehostaminen omakotitalossa.
http://www.rakennusperinto.fi/Hoito/Korjaus_artikkelit/fi_FI/Painovoimaisen_ilmanvaihdon_tehostaminen_omakotitalossa/. Luettu 30.10.2013.
 36. Pitkänen, Jenni. 2009. Lämpökuvaus tilaajan laadunvarmistamismenetelmänä. Ylempi amk, Opinnäytetyö, Tampere 11/2009.
<https://publications.theseus.fi/bitstream/handle/10024/8001/Pitk%C3%83%3fnen.Jenni.pdf?sequence=2>
 37. SP Technical Research Institute of Sweden. 2013. Test of Radon transmission, Ardex Oy.
 38. Järvenpää, Tapani. Opinnäytetyö. Metropolia AMK.
<https://publications.theseus.fi/bitstream/handle/10024/15606/YAMK%20Opinnaytetyo%20Tapani%20Jarvenpaa%202010The.pdf?sequence=1>

39. Heliö, Risto, Adato Energia Oy . Rikkiheksafluoridin (SF6) käyttö sähköjakelulaitteissa. 2011. Verkkodokumentti.
http://energia.fi/sites/default/files/yhteenveto_sf6_2011.pdf. Luettu 6.11.2013.
40. Karttunen, H., Koistinen, J., Saltikoff E. ja Manner, O. 2008. Ilmakehä, sää ja ilmasto. Tähtitieteellinen yhdistys Ursa, Helsinki.





Pystykuilun paine-ero kokeita 6-10 suoritettaessa. Kuilun oven avaamiset kokeiden välillä näkyvät paine-eron muuttumisessa nollaksi.

Koe 6	AIKA	
3 bar 90 sek		
0:00		
0:30		
1:00		
1:30		
2:00		
2:30		
3:00	2:59-4:53	10-herkkyys, 10 lediä ledit paloi
3:30		
4:00		
4:30		
5:00		
	4:54-5:02	ei havaintoa
5:30	5:02-5:20	10-herkkyys, 10 lediä paloi
	5:21-6:20	ei havaintoa
6:00		
6:30	6:20-6:30	10-herkkyys, 10 lediä paloi
7:00	6:31-7:55	ei havaintoa
7:30		
8:00	7:55-8:05	10-herkkyys, 10 lediä paloi
8:30		
9:00		
9:30		
10:00		
10:30		
11:00		
11:30		
12:00		
12:30		
13:00	13:00	10-herkkyys, 1 led paloi 2 sek ajan
13:30		
14:00		
14:30		
15:00	Lopetus	

Koe 7 AKA	
3 bar 180 sek	
herkkyys 10	
0:00	
0:30	
1:00	
1:30	
2:00	
2:30	
3:00	2:56-4:06 10 lediä paloi
3:30	
4:00	
	4:07-4:58 ei havaintoa
4:30	
5:00	4:59-5:25 1 led
	5:26-6:10 ei havaintoa
5:30	
6:00	
6:30	6:11-7:05 10 lediä paloi
7:00	
	ei
	7:06-7:53 havaintoa
8:00	7:54-8:20 10 lediä paloi
	ei
	8:21-9:29 havaintoa
9:30	9:30-9:35 10 lediä paloi
10:00	9:36-10:59 ei havaintoa
11:00	11:00 3 led paloi
	11:02-
11:30	12:42 ei havaintoa
13:00	12:43- 10 lediä
	12:45 paloi
	12:46-
	13:04 ei havaintoa
	13:05- 10 lediä
	13:07 paloi
14:30	14:40- 10 lediä
	14:42 paloi

	14:43- 16:09	ei havaintoa
16:00	16:10	2 lediä paloi
		ei havaintoa
17:00	17:00	1 lediä paloi
18:30	18:30	3 lediä paloi
19:00		
19:30	19:50	3 lediä paloi
20:00		

Koe 8 AIKA

3 bar 180 sek

herkkyys 5

0:00

0:30

1:00

1:30

2:00

2:30

3:00

3:30

4:00

4:30

4:30

havainto, ledejä ei
syty.

5:00

5:30

6:00

5:59-6:40

1 led syttyy

6:30

7:00

7:30

8:00

8:30

9:00

9:30

10:00

10:30

11:00

11:02-11:04

1 led syttyy

11:30

12:00

12:30

13:00

13:18-13:22

1 led syttyy

13:30

14:00

14:30

15:00

15:30

16:00

16:30

17:00

17:30

18:00

18:30

19:00

19:30
20:00 loppetus